ORSAY
n° d'ordre : 3334

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

# THESE

présentée

Pour obtenir

Le titre de DOCTEUR 3e CYCLE
SPECIALITE : PHYSIQUE NUCLEAIRE - Option : Physique des Réacteurs

PAR

*ZAETTA Alain*

# ELABORATION D'UNE METHODE SIMPLIFIEE DE CALCUL NEUTRONIQUE DES REACTEURS DE LA FILIERE RAPIDE. APPLICATION A QUELQUES PROBLEMES LIES AU PROJET.

Soutenue le 16 novembre 1982 devant la Commission d'examen

| | | |
|---|---|---|
| MM. | HERPIN | Président |
| | BUSSAC | |
| | CLAUZON | |
| | RECOLIN | |
| | CABRILLAT | |

ORSAY
n° d'ordre : 3334

UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

# THESE

présentée

Pour obtenir

Le titre de DOCTEUR 3e CYCLE
SPECIALITE : PHYSIQUE NUCLEAIRE - Option : Physique des Réacteurs

PAR

*ZAETTA Alain*

# ELABORATION D'UNE METHODE SIMPLIFIEE DE CALCUL NEUTRONIQUE DES REACTEURS DE LA FILIERE RAPIDE. APPLICATION A QUELQUES PROBLEMES LIES AU PROJET.

Soutenue le 16 novembre 1982 devant la Commission d'examen

| | | |
|---|---|---|
| MM. | HERPIN | Président |
| | BUSSAC | |
| | CLAUZON | |
| | RECOLIN | |
| | CABRILLAT | |

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543515_0036

SUMMARY

The topic includes two parts :

- The elaboration of a calculation code specifically adapted to the parametric studies behaviour of LMFBR's cores in the neutronic field.

- A parametric study which allow a comparaison of the respective abilities to flatten flux and power shapes for the core concepts hereafter :

  - Homogeneous with variable compositions
  - Homogeneous with variable enrichments
  - Heterogeneous

This study shows the advantage of a hybrid concept based on variable compositions and enrichments.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le Laboratoire de Physique des Réacteurs, au Service d'Etude et de Développement des Coeurs du Département des Réacteurs à Neutrons Rapides au Centre d'Etudes Nucléaires de CADARACHE.

Que Monsieur A. HERPIN trouve ici l'expression de ma respectueuse reconnaissance pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le Jury de cette thèse ainsi que Monsieur le Professeur J. BUSSAC, Chef de Cabinet du Haut-Commissaire, qui a bien voulu en assurer la direction.

J'ai été très sensible au fait que Monsieur P. CLAUZON veuille bien être membre du Jury, qu'il trouve ici le témoignage de mes sincères remerciements.

Je remercie tout particulièrement Mademoiselle BARON, Ingénieur à la DEDR Saclay pour son soutien et ses conseils.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur J. RAVIER, Chef de la Section de Physique des Neutrons Rapides, où ce travail a été effectué.

Je sais gré à Monsieur J. RECOLIN, Chef du Laboratoire de Physique des Réacteurs, et Monsieur C. GIACOMETTI d'avoir toujours été disponibles, et grâce à leur aide, de m'avoir permis de mener à bien ce travail de recherche.

Je prie Monsieur J.C. CABRILLAT, qui a constamment suivi mon étude avec beaucoup d'attention, de croire à ma reconnaissance la plus vive.

Enfin qu'il me soit permis de témoigner ma reconnaissance à tous les ingénieurs, techniciens et collaborateurs de la SPNR, pour tous les rapports enrichissants que j'ai entretenus avec eux, et leur excellente coopération dans tous les domaines.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Première Partie LE CODE CESAR

Chapitre I - 1. Le formulaire CARNAVAL
2. Jeu de sections efficaces multigroupes du formulaire CARNAVAL
3. Calcul cellule - Code HETAIRE
4. Calcul spatial

Chapitre II - Caractéristiques visées d'un code de calcul type paramétrique

Chapitre III - Les solutions proposées
1. Au niveau informatique
2. Choix des caractéristiques du calcul spatial
3. Réalisation d'une bibliothèque de sections efficaces.
4. Prise en compte par des modèles de certains problèmes élémentaires.

Chapitre IV - Présentation détaillée de CESAR
1. Organigramme détaillé
2. Bibliothèque des sections efficaces microscopiques
3. Procédures optionnelles.

Deuxième Partie ETUDE PARAMETRIQUE

Chapitre I - Généralités

Chapitre II - Etude des concepts homogènes

Chapitre III - Etude du concept hétérogène

CONCLUSION

Bibliographie
Figures
Tableaux

ANNEXES I.1 Comparaison entre différents découpages énergétiques
I.2 Précisions sur le module : "Couplage Axial-Radial"
II.1 Problèmes liés aux barres de commande
II.2 Justifications d'approximations.

# Introduction

INTRODUCTION /1/

Depuis 1969, le programme de physique des Réacteurs à Neutrons Rapides au C.E.A. a été développé en soutien aux projets des centrales de puissance.

La phase initiale a abouti à la réalisation de la centrale Phénix (250 MWe).

La seconde phase du programme a été orientée en fonction des demandes des réacteurs de plus grande puissance, en particulier Super-Phénix. Cette phase s'est concrétisée début 1977 dans la réalisation du formulaire CARNAVAL IV.

Au-delà, l'évolution des projets et notamment les nouveaux concepts de coeur (par exemple coeur hétérogène), donne lieu à un programme de recherche et développement important dans le cadre duquel, le travail présenté ici s'insère.

Les études nécessaires à la conception d'un coeur de réacteur se présentent sous deux aspects :

1) Les études de projet :

Ces études concernent le calcul des caractéristiques d'une centrale avec les précisions requises (tableau 1) /2/.

Du point de vue neutronique, les principaux paramètres à déterminer sont :

- La masse critique,
- Les distributions de puissance,
- Les bilans matières en particulier les gains de régénération,
- L'Antiréactivité des barres,
- Les coefficients de réactivité en particulier l'effet de vidange Sodium et l'effet Doppler...

Les données neutroniques multigroupes nécessaires aux divers codes de calcul neutronique de projet sont constituées à partir d'un formulaire, appelé formulaire CARNAVAL pour les réacteurs à neutrons rapides français.

Par formulaire, on désigne un ensemble cohérent, de données de base (sections efficaces) et de méthodes de calcul, qualifié au moyen de mesures intégrales sur expériences critiques (exemples Masurca, Harmonie) ou sur centrale (Phénix).

Il est bien évident que les demandes des projets évoluent en fonction même de l'évolution de ces projets. Par conséquent la philosophie du formulaire est le reflet des préoccupations de l'époque :

- soit parce que les critères de précision du projet évoluent,
- soit parce que de nouveaux problèmes se posent.

On est donc amené à repréciser le formulaire en fonction de l'évolution des demandes.

Actuellement le formulaire CARNAVAL IV constitue l'outil de choix pour les études de projet.

2) Les études de "filière" :

Ces études concernent la recherche de nouvelles solutions de réacteurs ainsi que l'amélioration des performances et l'optimisation des caractéristiques d'un coeur.

Egalement, avant d'effectuer des études fines et détaillées, il est utile de réaliser des calculs simples de dégrossissage d'un problème ou de centrage d'un domaine d'étude.

Il est évident que ces études préliminaires, que l'on peut qualifier d'études systématiques et paramétriques, ne nécessitent pas le même degré de précision que les études de projet, leur but étant de définir des tendances, des domaines intéressants plutôt que des valeurs en absolu.

L'objet de ce travail se situe dans ce contexte par :

Premièrement la mise au point d'un outil spécifiquement adapté, en effet les codes de projets intégrés au formulaire CARNAVAL se révèlent être trop lourds et pénalisants pour des études de ce type.

L'outil réalisé ici sous la dénomination de code CESAR (Code d'Etudes Systématiques Appliquées aux Rapides), est présenté dans une première partie.

Deuxièmement une étude paramétrique montrant les performances du code réalisé et permettant de comparer la capacité respective à aplatir les nappes de flux et de puissance, des concepts de coeur suivants :

- homogène à Enrichissements variables,
- homogène à Compositions variables,
- hétérogène.

Cette étude fait l'objet de la deuxième partie.

PREMIERE PARTIE

# LE CODE CESAR

-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§

Pour souligner la nécessité d'un outil adapté aux études paramétriques, qui doit répondre à certaines qualités, il est utile de décrire le schéma général d'un calcul de coeur et sa réalisation pratique telle qu'elle se présente actuellement dans le cadre du formulaire CARNAVAL.

# CHAPITRE I

## I.1 -- LE FORMULAIRE CARNAVAL

Le schéma de calcul est indiqué tableau (n°2). Le code de cellule est le premier chaînon de la batterie de codes utilisés dans l'étude neutronique d'un réacteur. Son rôle est fondamental, car c'est lui qui génère l'ensemble des données nucléaires multigroupes à utiliser dans les calculs de réacteur, en tenant compte des particularités de chacun des milieux qui composent ce réacteur.

Trois problèmes essentiels doivent être traités aussi correctement que possible par le code de cellule de la filière à neutrons rapides :

Les effets de spectre, liés d'une part à la structure fine énergétique du spectre à l'endroit des résonances (auto-protection résonnante, particulièrement importante pour les isotopes fertiles et fissiles), d'autre part à la variation du spectre à l'intérieur de chaque groupe du découpage multigroupe (définition des sections efficaces de ralentissement élastique).

Les effets d'hétérogénéité du réseau. Quoique ces effets soient faibles dans les réacteurs de puissance de la filière à combustible oxyde refroidis au sodium leur prise en compte est essentielle pour l'interprétation des expériences intégrales, l'ajustement des données nucléaires du formulaire et la transposition des résultats expérimentaux aux réacteurs de puissance.

Les fuites, qui peuvent représenter jusqu'à 20 % des neutrons produits dans le coeur.

Dans le formulaire CARNAVAL, le code cellule traitant ces problèmes, est le code HETAIRE.

Dans HETAIRE, l'hétérogénéité de la cellule est prise en compte d'emblée dans le calcul du bilan neutronique. L'auto-protection résonnante est correctement traitée, même dans des cellules complexe grâce à l'utilisation de la méthode des sous-groupes.

Les corrections de ralentissement sont basées sur un calcul de ralentissement à l'intérieur du découpage à 25 groupes.

## I.2 - JEU DE SECTION MULTIGROUPE DU FORMULAIRE CARNAVAL

Le jeu de sections efficaces multigroupes du formulaire CARNAVAL est défini à 660 groupes d'énergie. Seules les sections efficaces qui nécessitent un découpage fin (élastique) sont traitées à 660 groupes. Pour les autres sections, compte tenu de l'utilisation de facteurs d'autoprotection, il n'est pas nécessaire d'utiliser un découpage fin et on a montré que 25 groupes d'énergie suffisaient.

Le jeu de données de base comprend donc trois types d'informations :

1/ Bibliothèque à 660 groupes d'énergie pour le ralentissement élastique entre 0.4 eV et 2 MeV.

2/ Bibliothèque à 25 groupes d'énergie, intervalle de léthargie $\Delta u = 0.5$ dans pratiquement toute la gamme d'énergie comprise entre l'énergie thermique et 14,5 MeV pour les autres réactions.

3/ Tabulation des facteurs d'autoprotection en fonction de la dilution et de la température pour les éléments résonnants entre 0,4 eV et 67 keV.

I.3 - CALCUL CELLULE (HETAIRE) /3/

Pour obtenir le bilan neutronique des différents milieux en mode fondamental , il faut résoudre l'équation de bilan sous sa forme multigroupe.

$$(D_g B^2 + \Sigma^t_g)\, \phi_g = \sum_{K \leq g} \Sigma_{k \to g}\, \phi_K + \chi_g\, S^f$$

Cette équation est résolue dans le code HETAIRE par un formalisme de probabilités de collision hétérogène en géométrie plane ou cylindrique. Pour cela les équations de bilan sont remplacées par un système équivalent d'équations couplées obtenu à partir de l'équation intégrale du transport.

$$V_j\, \Sigma\, t_j\, (E)\, \phi_j\, (E) = \sum_{i=1}^{n} V_i\, P_{ij}\, (E)\, S_i\, (E)$$

$$Si\, (E) = \int_0^\infty \Sigma_i\, (E' \to E)\, \phi_i\, (E')\, dE'$$

où $\phi_j\, (E)$ = Flux moyen en espace dans la région j

Si (E) = Source (densité d'arrivée) moyenne de fission et de ralentissement dans la région i.

$P_{ij}\, (E)$ = Probabilité de premier choc dans j des neutrons nés isotropiquement et uniformément dans i.

Les grandes lignes de la résolution de ce calcul sont les suivantes :

1/ Calcul du flux de pondération pour les sections élastiques :

Ce calcul est effectué en homogène à 660 groupes d'énergie. L'équation de bilan est résolue moyennant un certain nombre d'approximations testées numériquement :

a) Les sections lentement variables, autres que la section élastique, ainsi que le laplacien $B^2$ peuvent être calculés dans le découpage à 25 groupes du formulaire en utilisant des sections de transfert élastique approchées.

b) Les données sont ensuite discrétisées à 660 groupes et l'on résout l'équation de bilan dans ce découpage en tant qu'équation de ralentissement ($B^2$ est fixé) pour obtenir le flux fin de pondération à 660 groupes.

2/ A partir de là, le calcul est à 25 groupes d'énergie.

On traite alors le système équivalent à l'équation de bilan, dans le formalisme de probabilités de collision hétérogène avec :

- Calcul des sections efficaces autoprotégées (méthode des sous-groupes),
- Recherche de la fonction propre $B^2$ et du vecteur propre flux,
- Calcul des différents termes du bilan.

3/ L'ensemble des résultats permet alors de déterminer les sections efficaces effectives qui serviront ultérieurement dans les calculs spatiaux.

On définit ainsi pour chaque isotope des sections efficaces homogènes équivalentes $\sigma g^{H.H}$ par conservation des taux de réactions groupe à groupe :

$$\sigma g^{H.H} = \frac{\sum_i N_i \, V_i \, \phi_g^i \, \sigma_g^i}{V_t \, \bar{N} \, \bar{\phi}_g} \quad \text{où i : indice de région}$$

$$\text{avec } \bar{\phi}_g = \frac{\sum_i V_i \, \phi_g^i}{\sum_i V_i} \qquad \bar{N} = \frac{\sum_i N_i \, V_i}{\sum_i V_i}$$

$$V_t = \sum_i V_i$$

I.4 - CALCUL SPATIAL

Le calcul spatial se fait en considérant soit une, deux ou trois dimensions en géométrie plane, cylindrique ou hexagonale et en résolvant soit l'équation de la diffusion soit l'équation du transport.

Du point de vue pratique, un calcul de coeur se fait selon le schéma suivant :

| | | |
|---|---|---|
| (I) | Calcul des concentrations | Code COMAC |
| | | ↓ |
| (II) | Calcul Cellule | Code HETAIRE |
| | (pour chaque milieu) | ↓ |
| (III) | Calcul Spatial | Code spatial |

A chaque variation d'un paramètre modifiant les caractéristiques d'un milieu il faut boucler sur cet enchainement de codes. Pour des études paramétriques, ce schéma est beaucoup trop lourd et couteux.

Il est clair que cette structure n'est pas adaptée aux études de type systématique et paramétrique d'où la nécessité de créer un code de calcul neutronique qui réponde aux besoins de ce type d'étude.

Pour réaliser un code typiquement adapté aux problèmes des études paramétriques, il faut d'abord déterminer les caractéristiques de ce genre d'étude.

# CHAPITRE II

=:=:=:=:=:=

## CARACTERISTIQUES D'UN CODE DE CALCUL TYPE PARAMETRIQUE

1/ De par leur caractère répétitif, les études paramétriques nécessitent un grand nombre de cas à calculer. L'outil de travail doit donc être de structure simple et peu couteux.

2/ Des concepts différents sur le cycle, le type de combustible , la géométrie peuvent être étudiés . On peut citer :

- Les cycles Uranium-Thorium
  Uranium-Plutonium
- Les types Oxyde, Métal, Carbure pour le combustible
- Les géométries : Hétérogène, Homogène à Enrichissements variables, Homogène à compositions variables
- Des concepts nouveaux peuvent également apparaître.

Un code de calcul neutronique spécifique des études paramétriques doit donc s'adapter à des domaines très différents. Ceci nous conduit à l'idée de système ouvert, c'est-à-dire dans lequel, il soit facile d'insérer de nouvelles fonctions ou de modifier une fonction existante en étant sûr de ne pas perturber ce qui existe déjà. On ne peut atteindre cette caractéristique avec les codes actuels qui sont monolithiques et figés.

3/ Un grand intérêt est d'utiliser les paramètres pratiques de l'utilisateur c'est-à-dire les paramètres ayant un sens physique. En effet si l'on utilise que ces paramètres, on va dans le sens d'une meilleure compréhension de l'enchainement des données et des problèmes physiques.

Dans la même idée, il est intéressant de tenir compte d'un certain nombre de relations entre paramètres, traduisant les contraintes élémentaires de projet.

En résumé, l'outil de travail doit répondre aux trois caractéristiques suivantes :

- Simplicité et économie,
- Système ouvert,
- Langage et modèles près de l'utilisateur.

Maintenant il faut définir les solutions répondant au mieux à ces caractéristiques.

# CHAPITRE III

## LES SOLUTIONS PROPOSEES

Elles se divisent en quatre parties :

III.1 - Au niveau informatique, le choix des outils de programmation (ESOPE, LU, ARCHIVE) /4//5/ qui permettent de répondre, tout à la fois aux trois conditions. En effet, avec RAMSES, on peut réaliser le concept de programme modulaire qui regroupe l'idée de système ouvert et d'enchainement simple, voir automatiquement, entre les différents programmes du système.

ESOPE : Une extension du langage FORTRAN, fournit des moyens de structuration et de gestion des informations très simples qui n'existent pas dans les autres langages de programmation. Les simplifications structurelles globales que cela entraine permettent d'obtenir des programmes très performants.

De plus : sa structure d'espace mémoire décomposée en une zone de mémoire rapide et une zone de mémoire secondaire évite l'utilisation explicite de fichiers de travail intermédiaire et minimise, voir supprime les Entrées-Sorties (on verra que l'on diminue d'un facteur 3, le coût d'un même travail en passant du Fortran classique à ESOPE).

Par ailleurs les segments (*) étant créés et supprimés dynamiquement, ils n'occupent de place en mémoire (rapide ou secondaire) que pendant la durée de leur existence.

*Segment : Un segment est un regroupement, défini par le programmeur, de variables simples ou de tableaux permettant de définir des entités informatiques significatives du problème à traiter.

LU est un langage au niveau des données qui permet l'enchainement entre les programmes. Son atout essentiel réside dans la possibilité de laisser les données sous forme de variables, autorisant ainsi des itérations automatiques ou réfléchies grâce à des tests de précision générés par des utilitaires LU.

Cela va dans le sens d'une simplification des données car l'on peut définir, pour une étude bien précise, une structure de données écrite sous forme de variables et itérer sur une ou plusieurs variables pour avoir avec un seul passage machine les résultats de plusieurs cas différents, tout en ayant la possibilité de conditionner les itérations par des tests de précision.

On peut même envisager, mais là l'utilitaire LU n'existe pas encore, de stocker ces structures de données, qui peuvent faire plusieurs pages de listing, sous un seul nom et qu'en rappelant ce nom, le calcul se déroule automatiquement. Par exemple nous verrons plus loin que l'on a réalisé une procédure assurant le couplage entre une étude radiale et une étude axiale.

Cette procédure est traduite par un algorithme, en langage LU, assez long. Il serait donc possible de stocker cet algorithme, caractéristique du couplage Axial-Radial, sous un titre et chaque fois que l'on aurait besoin d'effectuer ce couplage, il suffirait d'appeler l'algorithme mémorisé. Bien entendu, on peut généraliser à d'autres problèmes.

On voit donc tout l'avantage que cela offre pour des études paramétriques.

ARCHIVE permet de stocker et de gérer les résultats :

Ainsi les enchainements d'exécution peuvent être discontinus dans le temps.

Les outils utilisés sont donc typiquement adaptés au problème des études paramétriques et permettent d'obtenir un code de calcul ouvert, performant, facile à maintenir et à faire évoluer.

III.2 - LE CHOIX DES CARACTERISTIQUES DU CALCUL SPATIAL

Pour des études paramétriques, il n'est pas nécessaire d'avoir une représentation géométrique détaillée du coeur. Des traverses radiales et axiales suffisent à donner les informations recherchées. Ainsi pour des raisons de simplicité et de coût, une étude à une dimension géométrique s'imposait.

Le découpage énergétique à 25 groupes issu du code HETAIRE (tableau n°3) constitue le découpage de base. Il est couramment, pour les études de projet, condensé à 6 groupes. (Tableau 4)

Dans notre cas, toujours pour des raisons de coût, on a tout intérêt à travailler avec un découpage le plus réduit possible. Travailler à un seul groupe est imprécis car on ne prend pas en compte les effets de spectre aux interfaces entre milieux différents, ce qui est, par exemple, particulièrement important pour les coeurs hétérogènes.

Par rapport aux 6 groupes type projet, un découpage intermédiaire entre un et six groupes n'offre pas d'amélioration notable au niveau du coût, par contre, il nécessite une étude préalable de qualification. Pour ces raisons, le choix du découpage à 6 groupes type projet, qualifié et couramment utilisé, semble le plus raisonnable. A ce sujet, l'annexe I.1 apporte des éléments de comparaison entre les différents découpages énergétiques.

On traite l'équation de la diffusion. Une résolution analytique multigroupe est difficile à mettre en oeuvre, de ce fait on choisit d'utiliser la méthode numérique dite par différences finies, méthode qui est couramment utilisée dans les codes de calcul actuels, mais qui présente l'inconvénient d'être liée à la précision de la résolution.

III.3 - LA REALISATION D'UNE BIBLIOTHEQUE DE SECTIONS EFFICACES

Pour alléger et simplifier la structure Calcul Cellule-Calcul Spatial, il faut éviter de recourir à un enchainement discontinu de différents codes. On n'a vu, que le schéma classique, oblige à calculer d'abord les concentrations isotopiques par milieu par le code CARMEC, ensuite d'introduire ces concentrations dans HETAIRE. (A chaque milieu correspond un calcul HETAIRE)

et enfin d'utiliser les sections efficaces. (éventuellement condensées par un code indépendant) dans le code de calcul spatial. A chaque variation d'un paramètre, modifiant les caractéristiques des milieux, il faut boucler sur cet enchainement.

Une première amélioration consiste à reprendre le formalisme du code COMAC et à l'introduire dans un module intégré à CESAR, de manière à ce qu'une variation d'un paramètre se traduise automatiquement par de nouvelles concentrations isotopiques.

Dans l'optique d'utiliser des paramètres proches de l'utilisateur, les concentrations isotopiques ne sont pas des paramètres très "parlants", il est préférable de recourir aux pourcentages volumétriques et aux densités des différents matériaux (UO2-Pu O2, Acier, Sodium...)

Ces pourcentages volumétriques se révèleront d'ailleurs, être les mieux adaptés comme paramètres d'interpolation de la bibliothèque de sections efficaces.

En effet, il reste à assurer la jonction du code HETAIRE au code spatial, outre le coût élevé d'utilisation d'HETAIRE, cette structure discontinue n'est pas satisfaisante pour des études paramètriques. Utiliser un jeu unique de sections efficaces est trop imprécis comme on le voit sur le tableau n°5. La solution adoptée est de calculer les sections efficaces microscopiques propres à chaque milieu, par des formules adaptées dont les coefficients sont fonction des paramètres caractéristiques des milieux.

Une bibliothèque, en fait un fichier, regroupe tous ces coefficients et un module d'interpolation permet de constituer les jeux de sections efficaces nécessaires.

Evidemment cette méthode approchée ne doit pas introduire de trop grandes différences avec le calcul de référence HETAIRE. On vise des écarts, introduits par la méthode, de l'ordre de 100 à 200 pcm sur le coefficient de multiplication effectif (Keff) et de l'ordre de 1% sur les grandeurs type, puissances, gains de régénération etc...

Le fichier et le module étant intégrés dans le code paramétrique, on transforme ainsi le schéma classique à trois étapes en un code autonome d'où un double gain en facilité d'utilisation et en coût.

### III.4 - LA PRISE EN COMPTE PAR DES MODELES DE CERTAINS PROBLEMES ELEMENTAIRES

Des contraintes technologiques ou d'optimisation imposent des valeurs limites ou des relations implicites entre différents paramètres.

Par exemple, il existe une contrainte sur la puissance maximale linéique des aiguilles pour éviter la fusion du combustible. De même pour une raison de tenue des assemblages, problème de gonflement, on est tenu de ne pas dépasser une valeur limite du taux de déplacement par atomes (≃ 140 DPA).

Autre exemple, le critère d'optimisation du facteur d'aplatissement en puissance demande l'égalité des puissances maximales et la criticité en fin de cycle. Ceci impose certaines relations en particulier sur la valeur de l'enrichissement moyen et du rapport des enrichissements pour un coeur du type Super-Phénix, basé sur le concept homogène à Enrichissements variables.

Lors d'études paramétriques, il est difficile de respecter ces contraintes car à chaque variation d'un paramètre, il faudrait effectuer des calculs intermédiaires pour recaler les autres paramètres.

L'idée est donc de réaliser des modèles, spécifiques des problèmes à traiter, et de les traduire, soit en modules particuliers soit en algorithmes, comme le permet le langage LU.

Ces modules et algorithmes étant optionnels, on les introduit, selon les besoins, dans le schéma de calcul. Un aspect important qui mérite d'être souligné, est que l'utilisateur lui-même peut réaliser l'algorithme, correspondant à son problème particulier, grâce aux possibilités du langage LU. Et ceci sans toucher aux modules de base qui constituent le code CESAR.

Deux problèmes ont été ainsi traités, illustrant les deux aspects module-algorithme.

Premièrement un module de recherche des enrichissements initiaux d'un coeur homogène à 2 zones pour respecter le critère de criticité et d'égalité des puissances maximales en fin de cycle.

Deuxièmement un algorithme assurant le couplage entre une étude radiale et une étude axiale, afin de reconstituer des résultats comparables à ceux d'un code de calcul à deux dimensions.

En résumé, le code CESAR, regroupant les solutions proposées, possède les caractéristiques suivantes :

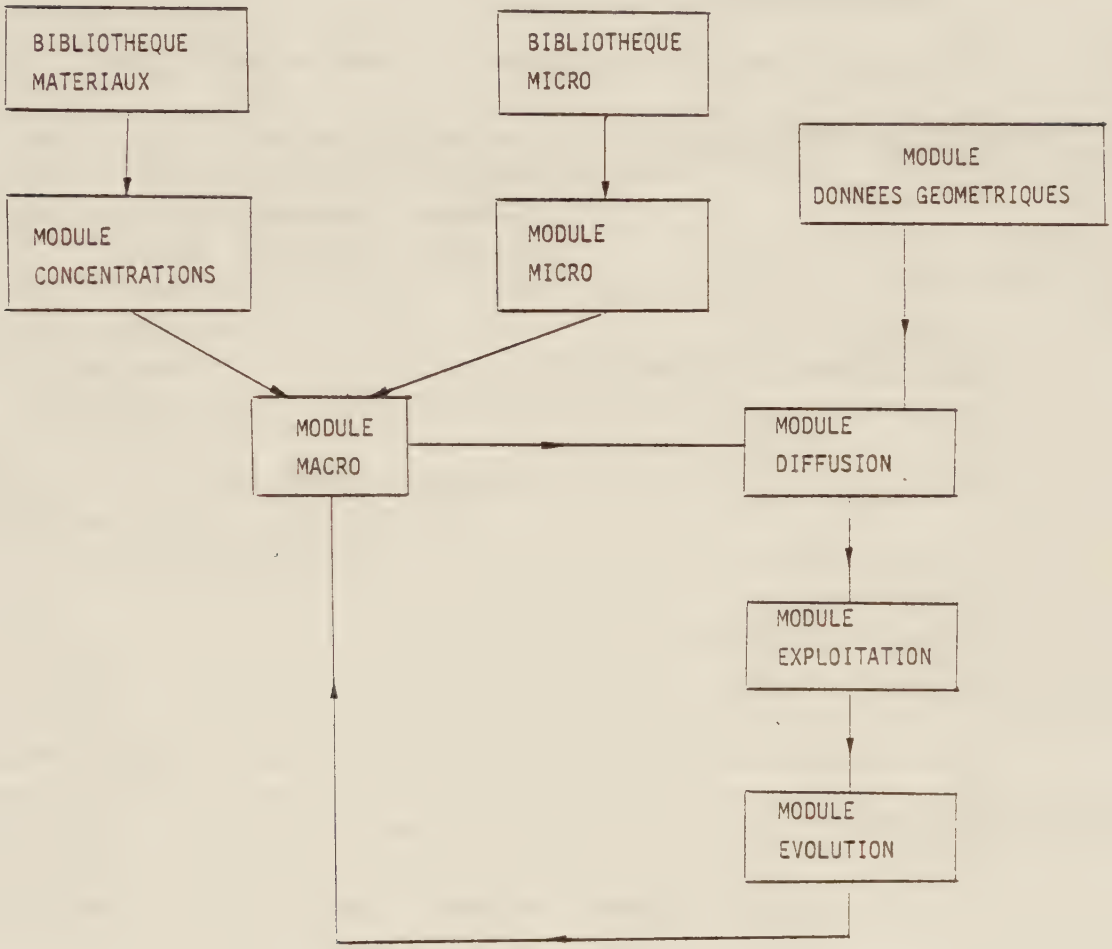
- Utilisation d'outils informatiques appropriés,
- Intégration dans CESAR du formalisme du code COMAC,
- Remplacement du calcul cellule HETAIRE par une bibliothèque adaptée.
- Résolution de l'équation de la diffusion à 1 dimension géométrique, par la méthode des différences finies, avec un découpage énergétique à six groupes.
- Module optionnel de recherche d'enrichissements respectant la criticité et l'égalité des puissances maximales en fin de cycle.
- Algorithme optionnel de couplage Axial-Radial permettant d'obtenir des résultats analogues à ceux obtenus avec un calcul à deux dimensions type R.Z.

# CHAPITRE IV

=:=:=:=:=:=

## PRESENTATION DETAILLEE DE CESAR

Le schéma de base de CESAR est le suivant :




En option, on peut introduire les procédures optionnelles de Recherche d'Enrichissements ou de couplage Axial-Radial, ainsi que le module BILAN.

Dans une première partie, on présente les différents modules :

- Concentrations
- MICRO
- MACRO
- GEOMETRIE
- DIFFUSION

- EXPLOITATION
- BILAN
- EVOLUTION

Puis dans une seconde partie, on s'intéresse plus particulièrement à la bibliothèque MICRO.

Les procédures optionnelles étant décrites dans une troisième partie.

## IV.1 - ORGANIGRAMME DETAILLE /6/

### IV.1.1 Module Concentrations :

La Bibliothèque Matériaux regroupe toutes les données de base qui sont :

Pour chaque matériau exemple | Les oxydes "$UO_2$" et "$PUO_2$"
| L'"Acier"des structures
| Les matériaux absorbants : "$B_4C$"
| Le matériau caloporteur : "Sodium"

- Les densités à 20°C
- Les compositions isotopiques
- Les coefficients de dilatation

Et pour chaque isotope, ses caractéristiques propres à savoir :

- Son numéro physique
- Sa masse atomique
- Son énergie dégagée par capture
- Son énergie dégagée par fission

A partir de la bibliothèque, le module calcule, pour chaque milieu et en fonction des pourcentages volumétriques de chaque matériau, les concentrations isotopiques en nombre d'atomes par $cm^3$.

Le module effectue les corrections, inhérentes au fonctionnement à température nominale, sur la géométrie, les densités et les pourcentages volumétriques.

1/ Hypothèses sur les milieux physiques

Tous les milieux sont à la même température Tm moyenne entre la température d'entrée = Te, et la température de sortie = Ts du sodium.

2/ Hypothèses sur les dilatations (géométrie)

Radialement il faut distinguer la dilatation d'ensemble et les dilatations propres à chaque assemblage.

La dilatation d'ensemble est supposée commandée par le sommier dont la température est de Te : le motif géométrique de base hexagonal, donc les abscisses, se dilate comme l'acier, entre 20°C et Te.

Les dilatations propres sont fonctions de la température dans le milieu considéré (Tm).

Dans le coeur, le combustible, très rapidement lié à la gaine, se dilate comme cette gaine, donc comme l'acier entre 20°C et Tm.

Axialement, la dilatation ne dépend que de la température dans le milieu considéré (Tm) : les hauteurs se dilatent comme l'acier entre 20°C et Tm.

IV.1.2 Module MICRO

A partir de la bibliothèque de coefficients qui est explicitée dans la deuxième partie, le module établit les jeux de sections efficaces microscopiques à associer à chaque milieu selon ses caractéristiques qui sont :

- Le pourcentage volumétrique combustible (XC) et l'enrichissement volumétrique (E) pour les milieux de type combustible
- Le pourcentage volumétrique fertile (XF) pour les milieux de type fertile
- Un jeu standard pour les milieux de type

* Barre de controle (Acier-Sodium-$B_4C$)
* Suiveur de barre (Acier-Sodium)
* Protection (Acier-Sodium)

Le principe du calcul est le suivant :

Par exemple pour un milieu de type combustible, donc constitué d'oxyde mixte UO2-PUO2, d'Acier et de Sodium.

Pour chaque isotope, (i), groupe d'énergie (g) et type de section (t), la section efficace $\sigma(i,g,t)$ est donnée par un polynome fonction de l'enrichissement (E) les coefficients du polynome étant eux fonctions du pourcentage volumétrique combustible (XC).

L'ensemble des coefficients étant fourni par la bibliothèque.

IV.1.3 Module MACRO

A partir du module MICRO, qui fournit les différentes sections efficaces microscopiques par isotopes et par groupes, et du module CONCENTRATION, qui donne les concentrations isotopiques pour chaque milieu, le module MACRO calcule les sections efficaces macroscopiques par milieu et par groupes nécessaires au calcul de diffusion. Le calcul est le suivant :

$$\Sigma(g,m,t) = \sum_{i} n(i,m) * \sigma(i,g,m,t)$$

où $\Sigma$ (g,m,t) représente la section macroscopique

- pour la réaction de type t
- pour le milieu m.
- pour le groupe g.

n(i,m) le nombre d'atomes/cm$^3$ du corps i dans le milieu m et $\sigma$ (i,g,m,t) la section microscopique.

L'équation de la diffusion multigroupe homogène s'écrit :

$$- \nabla (Dg \nabla \varphi g) - \Sigma^a_g \varphi_g = \frac{\chi_g}{\lambda} \sum (\nu \Sigma^f_g) \varphi_g$$

$$+ \sum_{g' < g} A_{g' \to g} \varphi_{g'}$$

g indice de groupe et $\varphi_g$ flux dans le groupe g :

Le module fournit donc :

- Le coefficient de diffusion $D_g$
- La section macroscopique d'absorption $\Sigma^a_g$

  (capture + fission + départ élastique et inélastique)
- Le spectre de fission $\chi_g$
- La section de production $(\nu \Sigma^f_g)$
- La matrice de transfert représentant les neutrons arrivant dans le groupe g par choc élastique et inélastique depuis les groupes d'énergie plus élevée.

$A_{g' \to g}$

Le calcul du coefficient de diffusion $D_g$ appelle deux remarques :

Premièrement on effectue ni correction d'hétérogénéité, ni correction de fuite.

Deuxièmement $D_g = 1/3 \div \Sigma^{tr}_g$ , pour conserver le "taux de fuite" la méthode de référence impose de condenser non pas sur la section microscopique, comme pour les autres réactions, mais sur la section macroscopique. On est donc obligé de calculer les sections macroscopiques de transport à 25 groupes et ensuite de condenser à 6 groupes.

IV.1.4 - Module Geométrie

Ce module calcule les données géométriques nécessaires au calcul de diffusion.

En particulier il détermine les abscisses des points de calcul en fonction du maillage demandé, ainsi que toutes les grandeurs inhérentes au calcul par différences finies.

IV.1.5 - Module Diffusion /7/

Ce module résout l'équation multigroupe homogène de la diffusion par la méthode des différences finies. Le calcul se fait par itérations successives jusqu'à atteindre la précision requise sur le Keff. Le module fournit en sortie les flux ponctuels par groupes.

Le principe de résolution est le suivant :

Chaque milieu physique est subdivisé en intervalles de façon à permettre l'approximation du système différentiel à étudier par un système d'équations aux différences.

Trois types de géométrie sont envisagés :

- La géométrie sphérique
- La géométrie cylindrique
- La géométrie plane

La prise en compte des fuites dans l'axe transverse est réalisé par l'introduction d'un buckling (B). Plusieurs options sont possibles pour les conditions aux limites :

- A l'origine : Flux nul ou courant nul,
- Aux interfaces entre milieu, on impose l'égalité des courants,
- A l'extrémité : Flux nul ou courant nul.

IV.1.6 - Module Exploitation

A partir de la carte de flux issue du module Diffusion, on calcule :
- Les puissances normalisées ponctuelles et moyennes par milieu
- Le facteur d'aplatissement en puissance
- Les taux de DPA instantanés
- Les taux de DPA intégrés sur le temps
- Le facteur d'aplatissement en DPA
- Les coefficients d'équivalence en Pu 239 des différents isotopes lourds
- Les gains de régénération des milieux évoluants

Hypothèses de base et Définitions :

1/ La normalisation des flux calculés par un module de résolution de l'équation de la diffusion est arbitraire.

Différents types de normalisation des flux peuvent être envisagés (flux total, puissance donnée en un point, puissance totale du réacteur etc...) C'est ce dernier type, le plus utilisé, que nous avons adopté.

2/ La majeure part de la puissance dégagée provient des fissions. L'énergie dissipée lors du ralentissement des neutrons n'apparait que comme un terme correctif.

On considère que tout neutron absorbé a été ralenti en moyenne d'une certaine quantité d'énergie $E^R$.

Ainsi l'énergie de ralentissement est simplement donnée par le produit du taux d'absorption moyen sur tout le réacteur et de $E^R$.

$E^R$ est fixé à 1.7 MeV, décalage moyen mesuré entre deux spectres représentatifs de fission et d'absorption.

Le terme principal du coefficient de passage entre flux et puissance est donné par la somme des taux de capture et de fission pondérés par les énergies dégagées par capture et par fission.

3/ Les DPA (Déplacements par atomes) caractérisent les dommages sur la gaine d'acier entourant le combustible.

Les taux de DPA instantanés sont donnés par le produit d'un jeu unique de sections efficaces de dommages par le flux neutronique.

En intégrant ces taux sur le temps, on obtient le dommage occasionné à la gaine.

4/ Les facteurs d'aplatissement représentent simplement les rapports des valeurs maximales sur valeurs moyennes de puissance ou de DPA sur les milieux de type combustible.

5/ Le combustible Pu issu des réacteurs à neutrons thermiques ou, ultérieurement, des réacteurs à neutrons rapides eux-mêmes, a des teneurs isotopiques en Pu extrêmement variables suivant le réacteur d'origine ou le taux d'irradiation. Etant donné les caractéristiques très différentes des isotopes fissiles Pu239 et Pu 241 d'une part, ou fertiles Pu240 et Pu 242 d'autre part, il est indispensable pour calculer les paramètres des centrales alimentées par du combustible Pu de teneur très variable, de définir une équivalence entre ces différents isotopes.

C'est une équivalence en bilan de neutrons introduite par Baker et Ross (ANL 7092) que nous utilisons. Elle correspond bien à la notion de gain de régénération et permet d'obtenir l'équivalence en réactivité et en masse critique avec une bonne approximation.

Les coefficients d'équivalence Wi sont définis par la formule :

$$\bar{W}i = \frac{\bar{\sigma}^+ i - \bar{\sigma}^+ f}{\bar{\sigma}^+ e - \bar{\sigma}^+ f}$$

avec $\bar{\sigma}^+ i = \frac{\bar{\nu}^f i}{\bar{\nu}\sigma} - (\bar{\sigma}^c i + \bar{\sigma}^f i)$

Les $\bar{\sigma}$ étant des valeurs moyennées sur les flux des milieux fissiles du réacteur considéré.

i étant l'indice d'un isotope d'élément lourd
e l'indice de l'isotope fissile équivalent
f l'indice de l'isotope fertile de référence

Les isotopes fissile équivalent et fertile de référence sont respectivement :

- $Pu^{239}$ et $U^{238}$ pour le cycle Uranium
- $U^{233}$ et $Th^{232}$ pour le cycle Thorium

Ces coefficients Wi sont les poids dont il faut affecter chaque isotope d'un élément lourd pour obtenir sa "valeur" en isotope fissile équivalent.

6/ Le gain de régénération global (GRG) est le bilan, en $Pu^{239}$ équivalent sur tout le réacteur, pour une fission.

Suivant que le bilan s'effectue sur le coeur ou sur les couvertures, on parlera respectivement de gain de régénération interne (GRI) ou externe (GRE)

Le gain de régénération est défini par la formule :

$$GR = \frac{\sum_i Wi\ (Ci - Ai)}{\sum Fi}$$

Où pour l'isotope i, sur la totalité des milieux combustibles et fertiles du réacteur, les termes suivants représentent :

Ci formation par réaction de capture et décroissance radioactive
Ai disparition par capture, fission et décroissance radioactive
Fi Fissions totales

Module BILAN

Ce module fournit :

1/ Des informations macroscopiques par groupes et par milieu :

- Sections de capture, fission, nu * fission, totale
- Coefficient de diffusion, Laplacien Matière et flux moyen

2/ Les flux ponctuels par groupes

3/ Le tracé sur graphique de la nappe de puissance (Normalisée à la puissance maximale)

4/ Le tracé de la nappe de flux (Normalisée au flux maximum) avec possibilité d'obtenir les nappes de flux par groupes.

IV.1.7 - Module Evolution

Le système d'équations différentielles relatif à l'évolution du combustible ou du fertile s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} \frac{d\vec{N}}{dt} = \overline{\overline{A}}\,\vec{N} \\ \vec{No} \quad \text{conditions initiales à } t = o \end{cases}$$

$\vec{N}$ est le vecteur des compositions isotopiques

$\overline{\overline{A}}$ une matrice dont :

- Les termes diagonaux caractérisent les disparitions par capture, fission et décroissance radioactive,
- Les termes non-diagonaux, les formations par capture et décroissance radioactive (ou formation par fission des produits de fission).

La solution est :

$\vec{N} = \vec{No}\ e^{\overline{\overline{A}}T}$ T durée de l'irradiation

Dans le cas général ($\overline{\overline{A}}$ quelconque) le calcul de la solution $\vec{N}$ ne peut se faire analytiquement il faut faire appel à un traitement numérique.

Dans le cas particulier où la matrice est triangulaire inférieure, un algorithme simple permet de calculer les vecteurs propres de $\overline{\overline{A}}$ et de donner une solution analytique au système. Ainsi nous avons choisi une chaine d'évolution réduite, conduisant à une matrice triangulaire inférieure, dont le schéma est indiqué tableau n°6

Le calcul d'évolution se résume dans ce cas, à résoudre un système d'équations. On utilise un flux moyen par région, constant durant le temps T. On est donc amené à sous-découper en régions les milieux combustibles et fertiles qui évoluent, ces régions étant suffisamment petites pour que l'évolution moyenne par région soit représentative.

IV.1.8 - Qualification

Ces sept modules constituent les modules de base du code CESAR.

Mis à part le module MICRO, qui fait l'objet de la deuxième partie, tous ces modules n'apportent rien d'original dans les formalismes de calcul. Ils reprennent les méthodes utilisées dans les codes classiques en particulier le code de diffusion à une dimension 1D3./8/

Pour les tester et les qualifier il fallait donc, pour être en tout point identique au code 1D3, remplacer le module MICRO par un module utilisant les sections efficaces issues d'HETAIRE. C'est ce qui a été réalisé dans une première version du code CESAR.

Des tests ont montré un parfait accord entre les codes et qualifient ainsi les six modules de base.

C'est cette première version de CESAR qui a servi d'outil pour les études nécessaires à l'élaboration de la bibliothèque de sections efficaces microscopiques.

## IV.2 - BIBLIOTHEQUE MICRO

Cette bibliothèque est un ensemble de coefficients permettant de constituer des jeux de sections efficaces microscopiques représentatifs du coeur étudié.

### IV.2.1 - Choix des paramètres

Le calcul des sections efficaces autoprotégées est fonction de la concentration des itosopes résonnants. Il semble donc logique de choisir les concentrations isotopiques comme paramètres. Mais ce choix présente deux inconvénients :

- Premièrement le nombre de paramètres, égal au nombre d'isotopes constituant le milieu, est élevé (une vingtaine pour des milieux de type combustible).

- Deuxièmement ce ne sont pas des paramètres très "pratiques" du point de vue utilisation et du point de vue compréhension physique.

Il est préférable d'utiliser les pourcentages volumétriques qui éliminent les deux inconvénients mais obligent à définir une composition isotopique de référence pour chaque matériau.

Le domaine d'application de la bibliothèque s'inscrit dans le cadre des choix technologiques fondamentaux de la filière rapide à savoir :

Combustible : Oxyde mixte UO2 - PuO2
Réfrigérant : Sodium
Structures : Acier inoxydable

Cinq types du milieu sont nécessaires pour représenter un coeur de réacteur :

- Milieu Combustible : caractérisé par les pourcentages volumétriques
  de combustible (XC)
  d'acier (XA)
  de sodium (XNA)
  de vide (XV) et par l'enrichissement (E)

$$E = \frac{X\ (PuO2)}{XC}$$

- Milieu Fertile : caractérisé par XF (pourcentage volumétrique d'UO2) XA,XNA et XV
- Milieu Barre de controle : caractérisé par XB (pourcentage volumétrique de $B_4C$) XA et XNA
- Milieu suiveur de barre : caractérisé par XA et XNA
- Milieu protection : caractérisé par XA et XNA

Les Pistes des corps et des compositions isotopiques de chaque milieu sont indiquées tableau n° 7

IV.2.2 - Domaines de variation

L'examen des caractéristiques des réacteurs de la filière rapide (tableau n°8) délimite les domaines de variation "réalistes" des différents paramètres.

Milieu Combustible $Xc \in [30,45]$ en %

$E \in [12,30]$ en %

$$R = \frac{XA}{XNA} \in [0.7, 0.8]$$

$XV \simeq 5$ %

Milieu Fertile $XF \in [30,55]$ en %

$R \simeq 0,75$

Milieu Barre, Suiveur, Protection : les compositions volumétriques sont pratiquement constantes ce qui permet de prendre des valeurs standard, on a choisi comme référence Super-Phénix.

IV.2.3 - Etudes de sensibilité des sections efficaces

Tout d'abord, il faut définir l'importance de chaque milieu. Il est évident que les milieux Barre, Suiveur et Protection ont un rôle secondaire. Par contre les milieux fertiles et combustibles caractérisent le comportement du coeur et doivent être calculés avec précision.

1/ Milieu Combustible

L'ajustement des sections efficaces de capture et de fission des isotopes lourds mérite un soin particulier car elles déterminent non seulement le bilan neutronique, comme on le voit sur le tableau n°9 qui indique l'effet en réactivité lié à la variation des sections efficaces, mais également les calculs des gains de régénération et d'évolution.

Dans une première étape, on ne considère que les deux paramètres principaux Xc et E (XV et R étant fixés). Pour tous les isotopes lourds, on établit les courbes de variation des sections efficaces multigroupes de capture et de fission en fonction de Xc et de E à partir de calcul cellule HETAIRE (des exemples sont données figures n° 1 à 8).

Des méthodes numériques de lissage permettent d'obtenir des formules analytiques avec des coefficients appropriés. On compare ensuite les valeurs obtenues par ces formules aux valeurs exactes HETAIRE, tant que la précision visée n'est pas atteinte, on affine les résultats en augmentant le nombre de points de calcul.

La section efficace de ralentissement élastique des éléments légers se révèle être très sensible aux variations de Xc et E et son influence sur la section totale non négligeable, d'où la nécessité de la paramétrer de la même manière (voir tableau n° 10).

Le spectre de fission ne présente pas de grandes variations, de même que les sections de transport et la matrice inélastique de transfert de groupe à groupe, ce qui autorise de prendre, pour toutes ces grandeurs, des valeurs moyennes .

Des tests de comparaison (voir chapitre IV.2.4) ont montré la faible influence des deux autres paramètres Xv et R, ce qui permet de les fixer à une valeur standard. (référence SPX1).

2/ Milieu Fertile

Le paramètre caractéristique est XF (pourcentage volumétrique d'UO2). Pour le calcul du Keff, l'importance des milieux fertiles est moindre que celle des milieux combustibles. (voir tableau n° 9).

L'ajustement des sections efficaces ne mérite donc pas le même degré de précision. La solution adoptée consiste en une simple interpolation linéaire, en fonction de XF, entre plusieurs jeux stockés dans la bibliothèque.

3/ Milieux Barre, Suiveur, Protection

Leurs compositions volumétriques ne bougent pratiquement pas selon les études, ce qui justifie pleinement l'utilisation d'un jeu de sections efficaces standard pour ces trois milieux (référence SPX1)

IV.2.4 - Tests et chiffrages des approximations

Dans ces tests, on s'est attaché à regarder les écarts sur le Keff, les puissances et gains de régénération introduits par l'utilisation de la bibliothèque par rapport au calcul exact HETAIRE. On a décomposé les effets selon le type du milieu.

Milieu Combustible

A partir d'une géométrie de type hétérogène, des comparaisons sur tout le domaine de variation ont été effectuées. Les écarts sur le Keff sont présentés dans le tableau n° 11. Pour les cas les plus défavorables on obtient + 100 pcm, ce qui est inférieur à la précision désirée.

L'influence du rapport pourcentage volumétrique acier sur pourcentage volumétrique sodium a été examiné pour une variation extrême de 0.7 à 0.8 (figure n° 9).

On enregistre un écart de

- + 100 pcm dans les cas extrêmes
- + 30 pcm dans la plage réaliste

Milieu Fertile

Pour des coeurs, de type hétérogène, l'interpolation entraine des écarts de l'ordre de 20 pcm sur le Keff, ce qui est tout à fait négligeable.

Pour les autres milieux, la constance de leurs compositions volumétriques entraine aucun écart sur le Keff.

Les approximations utilisées dans la bibliothèque se résument ainsi :

Combustible

- Sections de capture et de fission des isotopes lourds + Section élastique des éléments légers : Ecarts sur toute la plage d'étude.
- Les autres sections : Ecarts en dehors des valeurs moyennes (en particulier pour le coefficient de diffusion).
- Le rapport $R = \frac{XA}{XNA}$ : Ecart positif en dehors de la valeur de référence (SPX1)

Fertile

- Ecarts négatifs en dehors des valeurs stockées.

On peut ainsi déterminer le cas le plus défavorable :

Combustible Xc = 30 %
E = 30 % R = 0.8

Fertile XF = 35 %

Ce calcul a été effectué pour un coeur de type homogène et donne un écart de + 170 pcm.

Dans la plage réaliste d'étude, on peut chiffrer l'écart, introduit par l'utilisation de la bibliothèque, à ± 100 pcm (toutes erreurs confondus) sur le Keff, entrainant des écarts inférieurs au pour cent sur les valeurs de flux, de puissance, gains de régénération et déplacements par atomes.

Ces écarts sont acceptables dans le cadre d'études paramétriques qui indiquent des tendances, des domaines intéressants plutôt que des valeurs absolues.

IV.2.5 - Problème de la condensation des sections efficaces

Le Code HETAIRE calcule les sections efficaces autoprotégées à 25 groupes, la bibliothèque étant à six groupes le problème de la condensation des sections efficaces se pose.

La méthode de référence /9/ consiste à utiliser les flux neutroniques directs moyens, obtenus à partir d'un calcul spatial, comme flux de pondération.

Cette méthode qui respecte la conservation des paramètres directs (Keff, taux de réaction...) présente l'inconvénient majeur de nécessiter un calcul préalable à 25 groupes.

Pour l'élaboration de la bibliothèque, cette méthode n'est pas applicable car il est impossible de définir un flux spatial standard, représentatif de toutes les configurations étudiables (coeurs homogènes, hétérogènes...)

La solution adoptée est d'utiliser les flux cellules HETAIRE, calculés en mode fondamental, comme flux de pondération. Ceci implique des écarts pouvant atteindre 500 pcm sur le keff. Nous aurons donc toujours un écart de cet ordre par rapport à un calcul classique à 25 groupes, mais il ne faut pas perdre de vue que lors d'études paramétriques, ce sont les variations relatives qui nous intéressent, l'écart de base dû à la condensation des sections efficaces devenant alors transparent.

IV.2.6 - Aspect sur le coût

Le coût est proportionnel au nombre d'unités de compte CCU (≈ ≈ 3 francs)

Pour de mêmes caractéristiques de coeur, les CCU des différents codes sont :

| | Code 2D R.Z | Code 1D classique | Code 1D ESOPE | Code CESAR |
|---|---|---|---|---|
| 25 groupes | | 150. | 60. | |
| 6 groupes | 400. | 80. | 30. | 10. |

Comparaison 1D classique ⟷ 1D ESOPE

La différence réside dans l'utilisation d'ESOPE, le cout diminue dans un rapport de 2,5.

Comparaison 1D ESOPE ⟷ CESAR

La suppression de la bande de sections efficaces HETAIRE fait chuter considérablement les Entrées-Sorties (EXCP), la diminution du coût est dans un rapport 3.

Comparé au code 1D classique, le coût de CESAR est inférieur dans un rapport 8.

IV.3 - PROCEDURES OPTIONNELLES

Il est très intéressant, lors d'études paramétriques, de tenir compte automatiquement de certaines contraintes technologiques, d'optimisation ou de fonctionnement.

Pour cela il faut modeliser chacun des problèmes et les traduire soit en modules soit en algorithmes.

L'avantage de ces derniers est qu'ils se situent au niveau des données, donc réalisables par l'utilisateur en fonction de ses besoins.

Pour illustrer ces deux aspects, on présente : premièrement un module évaluant les enrichissements initiaux d'un coeur à deux zones, pour respecter la criticité et l'égalité des puissances maximales en fin de cycle.

Deuxièmement un algorithme assurant le couplage entre une étude radiale et une étude axiale.

IV.3.1 - Module optionnel : Evaluation (E1, E2)

Ce module évalue les enrichissements initiaux (E1, E2) d'un coeur homogène à deux zones d'enrichissements pour obtenir les valeurs du Keff et du rapport des puissances maximales désirées en fin de cycle.

Une approche analytique n'ayant pas permis de définir des relations simples satisfaisantes, on s'est tourné vers une solution paramétrique qui consiste en :

- Premièrement déterminer les paramètres importants qui régissent les variations du Keff et des puissances. Ce sont :

* L'enrichissement moyen pour le Keff.
* Le rapport E1/E2 pour les puissances

Le pourcentage volumétrique combustible, les volumes respectifs des deux zones, et la durée de cycle ayant un rôle correctif.

- Deuxièmement établir les courbes de variation des deux grandeurs en fonction des différents paramètres.
- Troisièmement traduire ces variations par des formules avec des coefficients appropriés.

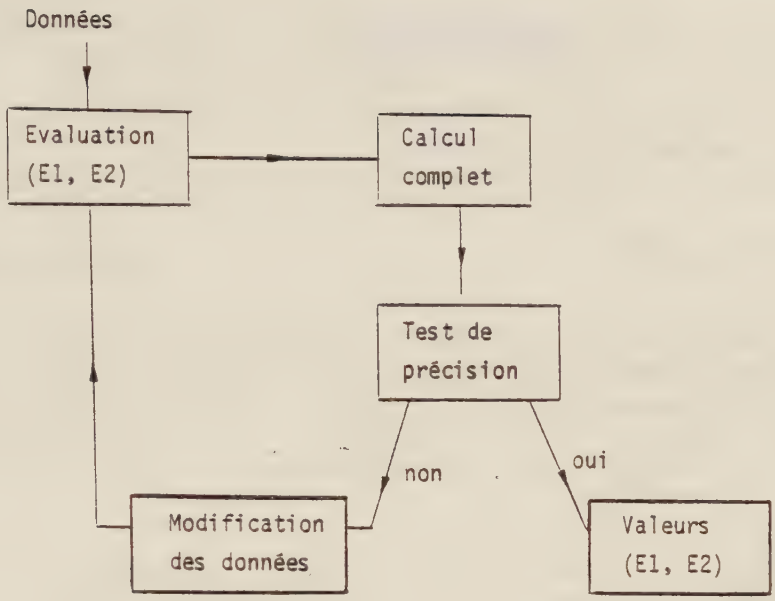
En inversant ces formules, on obtient les valeurs des paramètres réalisant les conditions demandées sur le Keff et le rapport des puissances.

Ces formules sont valables pour des caractéristiques de coeur entrant dans les domaines suivants :

Rayon $\in$ [125,250] en cm
XC $\in$ [30,45] en %

Durée de l'évolution voisine de 450 jepp.
Hauteur coeur voisine de 1m.

Le module évalue les valeurs (E1, E2). Si l'on désire des valeurs précises, une recherche par système itératif est nécessaire, dont le schéma est le suivant :




Pour des coeurs entrant dans le domaine de validité, une à deux itérations sont suffisantes pour obtenir le couple (E1, E2) donnant les valeurs demandées à :

- moins de 100 pcm près sur le Keff
- moins de 1 % près sur le rapport $Q_1^{max} / Q_2^{max}$

IV.3.2 - Couplage Axial-Radial

Le but de ce couplage est d'obtenir des informations comparables aux résultats d'un code à deux dimensions.

Pour cela deux calculs sont nécessaires, un en axial et un autre en radial. La corrélation entre axial et radial est réalisée par deux paramètres que l'on rentre de façon arbitraire dans le code, ce sont :

- Le buckling (B) qui représente, au coefficient de diffusion près, les fuites dans l'axe transverse.
- La puissance de normalisation (Pn).

Le problème se résume à déterminer les B et Pn des deux études pour qu'elles soient cohérentes, c'est-à-dire représentatives d'un même coeur.

Pour un coeur à deux zones d'Enrichissement en géométrie cyclindrique :

Calcul radial

On représente la configuration radiale du coeur par une tranche de 1 cm de hauteur

$$B^{axial} = \text{Laplacien géométrique} = \left(\frac{\pi}{Hex}\right)^2$$

avec Hex = Hauteur coeur extrapolée

$$*Pn^{radial} = \alpha \frac{Ptot}{Hc}$$

avec Ptot = Puissance totale
Hc = hauteur coeur
$\alpha = \frac{Pcoeur}{P_N^{axial}}$ (tiré du calcul axial)

Calcul axial :

Pour obtenir des valeurs moyennes, on étudie un cylindre de 1 $cm^2$ de base représentant le coeur d'Enrichissement moyen. On pose :

$$*P_n^{axial} = \frac{Ptot}{\pi R_c^2}$$ Rc = Rayon du coeur

$*B^{radial}$ : la détermination du buckling pose un problème car il n'est pas possible de le définir simplement. Le seul critère de choix est qu'il doit assurer la cohérence c'est-à-dire un keff (axial) voisin du keff (radial). Pour cela une étude paramétrique a permis d'obtenir des formules donnant ce B adapté à chaque coeur (voir annexe I.2).

Moyennant ces hypothèses, l'algorithme du couplage Axial-Radial est le suivant :

(1) Détermination de l'enrichissement moyen $\bar{E}$ à partir des caractéristiques du coeur (Module Evaluation E1, E2)

(2) Calcul axial avec $B^{radial}$ et $P_n^{axial}$ adaptés d'où l'on tire :

- Gain en réactivité des couvertures axiales $\Delta K(C.A)$
- Gain de régénération des couvertures axiales G (C.A)
- Facteur de forme axial (F.F.A)
- Coefficient $\alpha$ = Pcoeur / $P_n^{axial}$

(3) Calcul radial avec $B^{axial}$ et $P_n^{radial}$ adaptés

(4) Bilan global

Résultats du calcul radial

+ les corrections sur la réactivité en tenant compte de $\Delta K$ (CA)
sur le gain de régénération en tenant compte de G (CA)
sur la puissance maximale en tenant compte de F.F.A

Les formules et la qualification de cet algorithme sont présentées en annexe I.2

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

En conclusion, le code CESAR, de par les langages informatiques utilisés, présente toutes les qualités de souplesse et d'économie nécessaires aux études de type paramétrique. Mais, sa principale originalité réside dans l'utilisation d'une bibliothèque multigroupe de sections efficaces microscopiques, qui permet de s'affranchir du recours obligatoire au code de calcul cellule HETAIRE.

Du point de vue développement, l'élaboration de bibliothèques de sections efficaces, du même type que celle réalisée, mais adaptées à d'autres choix ou options, par exemple :

- Combustible mixte Uranium-Plutonium sous forme métallique ou carbure
- Cycle de combustible Uranium-Thorium

semble le plus intéressant.

De même une étude de minimisation du nombre de groupes du découpages énergétique permettrait d'améliorer encore les performances du code.

Un autre aspect à développer est d'élargir le nombre de prise en compte automatique de certains critères ou de relations entre paramètres imposés par le projet, par exemple: l'existence d'une butée en puissance linéaire, etc...

Mais il faut souligner que certaines de ces relations sont particulières à des études bien précises, et que par conséquent il est souhaitable de laisser l'utilisateur, réaliser cette automatisation lui-même, comme le permet le langage informatique utilisé.

DEUXIEME PARTIE

# E T U D E  P A R A M E T R I Q U E

-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-§-

# CHAPITRE 1

## GENERALITES /13/

Pour réduire le coût du cycle de combustible d'un réacteur à neutrons rapides, il faut tirer le maximum d'énergie :

- de chaque assemblage (réduction des coûts de fabrication et de démantellement du combustible)

- de chaque kilogramme de combustible (pour réduire les coûts de retraitement)

Pour cela on recherchera :

a) Des temps de séjour en pile élevés.

b) De fortes puissances spécifiques (définies comme le rapport de la puissance thermique dégagée sur la masse de combustible).

a) A l'heure actuelle, le combustible doit être déchargé lorsqu'il a atteint un certain dommage sur la gaine (évalué à l'aide du nombre de déplacements par atome, noté DPA). Pour maximiser le temps de séjour, il faut tendre à ce que tous les assemblages combustible atteignent leurs limites technologiques ensemble, c'est-à-dire que le coefficient d'aplatissement en DPA (défini comme le rapport du déplacement maximal sur le déplacement moyen dans le coeur) soit le plus proche possible de 1.

b) De même, pour tirer le maximum d'énergie de chaque kilogramme de combustible, on cherche à aplatir au mieux la nappe de puissance, caractérisée par le facteur d'aplatissement en puissance (défini comme le rapport de la puissance maximale sur la puissance moyenne sur tout le coeur).

### I.1 - DEFINITIONS :

#### I.1.1 Aplatissement en D.P.A.

Au cours de l'irradiation, la gaine d'acier entourant le combustible subit des dommages que l'on caractérise par une grandeur appelée D.P.A. (Déplacements par atomes). Cette grandeur ne doit pas dépasser une valeur limite sous peine de risque de rupture de gaine. Actuellement la

borne est fixée à environ 150 DPA, de nouveaux types d'acier laissent espérer pouvoir repousser cette limite vers 200-220 DPA.

On obtient le taux de DPA ($\tau$) à l'instant t en multipliant la section efficace de dommage $\sigma d$ par le flux neutronique $\phi$ (t).

$$\tau (t) = \sigma d \times \phi (t)$$

Le nombre intégré de DPA est donné par :

$$DPA (T) = \int_0^T \tau (t) \, dt$$

L'aplatissement en DPA est lié dans le coeur à l'aplatissement en flux. Lorsque l'aiguille la plus irradiée a atteint le nombre maximal de DPA, l'assemblage doit être déchargé. Ainsi plus la forme radiale de flux est aplatie plus le temps de séjour des assemblages augmente d'où une meilleure utilisation du combustible.

I.1.2 Aplatissement en puissance

Le nombre de kilomètres (LKm) d'aiguilles combustible nécessaires pour produire la puissance souhaitée (Pnwth) est défini à partir de la puissance linéique maximale ($q^L$max W/cm) admissible sur le combustible par la relation :

$$LKm = \frac{10 \, Pnwth}{q^L_{max} \, W/cm} \left( \frac{q^L \, max}{\bar{q}} \right)$$

où $\left( \frac{q^L max}{\bar{q}} \right)$ facteur d'aplatissement de la puissance, est le rapport entre la puissance linéique maximale, et la puissance linéique moyenne.

On passe de la puissance linéique $q^L$ (W/cm) à la puissance volumique q (W/cm$^3$) par la relation :

$$q^L = q \times \frac{S \, comb}{X \, comb}$$

où S comb = Section de la pastille combustible.
X comb = Pourcentage volumétrique combustible.

$$\text{Par définition } X \, comb = \frac{Naig \times S \, comb}{S \, hexa}$$

avec Naig = Nombre d'aiguilles dans l'assemblage hexagonale
S hexa = Surface de l'hexagone

D'où une relation équivalente :

$$q^L\ (W/cm) = q \times \frac{S\ hexa}{Naig}$$

Le facteur d'aplatissement en puissance peut donc être défini par le rapport entre les puissances volumiques maximale et moyenne.

$$\gamma p = \frac{q^{max}}{\bar{q}}$$

La masse de combustible nécessaire pour produire la puissance souhaitée est proportionnelle à ce facteur, d'où l'intérêt évident à le minimiser.

I.2 - TECHNIQUES D'APLATISSEMENT :

Pour minimiser ces facteurs d'aplatissement, plusieurs solutions se présentent :

Du point de vue axial, on peut notablement améliorer l'aplatissement par l'introduction d'une plaque fertile, c'est-à-dire que l'on introduit des pastilles fertiles dans la colonne fissile de l'aiguille. Cette technique a été largement étudiée et ne présente pas de larges possibilités d'innovation. /16/

L'aspect radial autorise lui, plus de possibilités :

Pour un coeur de conception la plus simple possible c'est-à-dire constitué d'un seul type de combustible (en géométrie cylindrique, le flux neutronique se comporte comme une fonction de Bessel d'ordre o, en Jo), on obtient des facteurs d'aplatissement en flux et en puissance de l'ordre de 2.

I.2.1 Concepts homogènes

Pour diminuer ces facteurs d'aplatissement, une des techniques consiste à relever le niveau de puissance à la périphérie du coeur et pour cela à augmenter la concentration des noyaux fissiles dans cette zone.

Ceci peut s'obtenir par un découpage radial du coeur en régions de caractéristiques différentes. L'aplatissement est d'autant meilleur en théorie que le découpage est plus fin. En fait nous nous heurtons alors sur le plan technologique à des obstacles qui augmentent avec la finesse du découpage.

Ainsi se limite-t-on à l'étude de coeurs à seulement deux zones : une zone centrale et une zone externe du type Phénix, Super-Phénix...)

| Coeur 1 zone centrale | Coeur 2 zone externe |
|---|---|

En fait ce découpage à deux zones permet déjà d'obtenir des performances satisfaisantes.

Pour augmenter la concentration des noyaux fissiles dans la zone externe trois solutions se présentent :

a) Maintenir le pourcentage volumétrique du combustible égal dans les deux zones, et augmenter l'enrichissement en plutonium dans la zone externe du coeur.

C'est le concept de coeur homogène à 2 zones d'enrichissements variables.

b) Modifier les pourcentages volumétriques de combustible des deux zones en gardant constant l'enrichissement sur tout le coeur.

C'est le concept de coeur homogène à 2 zones de compositions volumétriques variables.

c) Une solution hybride des deux premières qui consiste à différencier et le pourcentage volumétrique combustible et l'enrichissement des deux zones.

L'étude de ces concepts homogènes fait l'objet du deuxième chapitre.

I.2.2 Concept hétérogène :

Le concept hétérogène est une autre technique d'aplatissement possible mais elle est de nature différente. Il ne s'agit plus d' augmenter la concentration fissile de la zone externe, mais d'introduire judicieusement des zones fertiles à l'intérieur du coeur, afin d'aplatir la nappe de flux. Le combustible étant unique, on obtient ainsi un bon aplatissement en flux et en puissance.

L'étude de ce concept fait l'objet du troisième chapitre.

## I.3 - CRITERES GENERAUX DE L'ETUDE

Le but de l'étude est de déterminer l'aptitude de tel ou tel de ces concepts à aplatir les nappes de flux et de puissance selon la gamme des volumes de coeur choisie.

Les calculs sont réalisés en une dimension géométrique et on s'intéresse uniquement à l'aspect radial qui offre le plus de possibilités d'optimisation.

Compte-tenu du nombre de paramètres (volume coeur, volumes des différentes zones, enrichissements, pourcentages volumétriques combustible,...) et de leurs domaines de variations, un très grand nombre de cas doivent être calculés, ce qui constitue une parfaite illustration des possibilités du code CESAR que l'on a utilisé lors de cette étude.

Tout au long de l'étude, on s'est attaché à déterminer les minimums des facteurs

d'aplatissement en fonction des principaux paramètres qui sont :

- Le volume du coeur
- Les volumes des différentes zones

  Pour les concepts homogènes :
- Soit le rapport des enrichissements des deux zones
- Soit le rapport des pourcentages combustible des deux zones.

  Pour le concept hétérogène
- La position des zones fertiles.

L'étude en évolution de la nappe de puissance (et de flux) nécessite la prise en compte des barres de commande.

En effet, on utilise celles-ci, par un mouvement différentiel, pour aplatir tout au long du cycle, la nappe de puissance.

Cette prise en compte complique sérieusement l'étude paramétrique car il faut définir, pour chacun des concepts et les différents volumes, une répartition géométrique et un mouvement de barres représentatifs de chaque cas.

Nous nous sommes donc restreints à comparer les capacités respectives de chaque concept, à un instant donné, plus précisément en fin de cycle, car les barres étant alors hors du coeur, leur influence devient négligeable.

Le problème se pose alors de savoir si les conclusions tirées de cette comparaison "figée" sont modifiées si l'on considère l'aplatissement tout au long du cycle de fonctionnement.

Cette question est spécialement traitée dans l'annexe II.1 où l'on montre que l'influence du mouvement des barres de commande est la même quelque soit le concept étudié et ne modifie donc pas les conclusions générales de l'étude.

# CHAPITRE II

## CONCEPTS HOMOGENES

### II.1 - FACTEUR D'APLATISSEMENT EN FLUX

#### II.1.1 Principe de l'étude

Pour couvrir la gamme des coeurs de la filière rapide

- Phénix 1,4 $m^3$
- SPX1 10 $m^3$
- SPX2 15 $m^3$
- Filière 20 $m^3$

Nous avons choisi d'étudier des coeurs de volume 5, 10 et 20 $m^3$.

Pour différentes valeurs du rapport V1/V2, volume zone interne sur volume zone externe, on fait varier le paramètre $\alpha$ qui est :

- Soit XC1/XC2, rapport des pourcentages combustible des deux zones pour le concept à Compositions variables.

- Soit E1/E2, rapport des enrichissements des deux zones pour le concept à Enrichissements variables.

Le pourcentage combustible moyen $\overline{XC}$ et l'enrichissement moyen $\overline{E}$ sont constants pour un volume donné. Cette façon de procéder ne conserve pas la réactivité mais on peut noter que les facteurs d'aplatissement sont peu sensibles à une variation de $\overline{XC}$ ou de $\overline{E}$ qui permettrait de recaler cette réactivité. (voir tableau n° 12)

On constate qu'une variation de l'ordre de 20% sur le pourcentage volumétrique combustible ou sur l'enrichissement moyen entraine une modification du facteur d'aplatissement inférieure à 0.5 %, ce qui autorise pleinement à travailler à pourcentage combustible et Enrichissement moyens constants.

#### II.1.3 Résultats

Les figures n° 10 à 15 indiquent pour les deux concepts et les différents volumes, les variations du facteur d'aplatissement en DPA en fonction du paramètre $\alpha$ et des rapports V1/V2.

La courbe en trait plein réunit tous les minimums. On remarque la grande sensibilité du facteur d'aplatissement aux variations de $\alpha$. Pour les deux concepts et quelque soit le volume, on atteint un facteur d'aplatissement minimal de 1,05.

Ceci pour des configurations où le volume du coeur 1 représente environ 80 % du volume total et pour des rapports $\frac{E.1}{E.2}$ allant de 0.65 pour 20 $m^3$
à 0.45 pour 5 $m^3$ (0.79 pour SPX1)

ou $\frac{XC1}{XC2}$ allant de 0.5 pour 20 $m^3$
à 0.35 pour 5 $m^3$

Ce sont donc des configurations extrêmes, difficilement réalisables sur le plan pratique, mais qui ont le mérite de bien faire comprendre le phénomène et de donner une valeur limite du facteur d'aplatissement en DPA.

En effet la courbure du flux dans le coeur 2 étant inévitable, on a tout intérêt, du point de vue aplatissement, à minimiser son "poids", en prenant un rapport V1/V2 grand. Ensuite il est toujours possible de déterminer un XC2, ou un E2 selon le concept, pour compenser les fuites du coeur 1 et ainsi obtenir un flux plat dans le coeur 1. C'est ce que réalisent les configurations précédentes.

Pour un découpage géométrique fixé, (même volume total, même rapport V1/V2) les deux concepts donnent les mêmes minimums du facteur d'aplatissement. Les deux concepts se révèlent donc être équivalents dans leur capacité à aplatir la nappe de flux, la seule différence se situant au niveau des valeurs du rapport $\alpha$ optimales, qui sont plus petites pour le concept à compositions variables que pour le concept à enrichissements variables. Ce qui dans la pratique rend plus difficile le concept compositions variables à réaliser, la plage de variations du pourcentage volumétrique combustible étant plus réduite que celle de l'enrichissement.
En effet les domaines de variations "réalistes" du pourcentage combustible et de l'enrichissement sont : $XC \in [30\ \%, 45\ \%]$
$E \in [12\ \%, 30\ \%]$

=>

$$\frac{XC1}{XC2}\,(\text{minimum}) \simeq 0.65 \quad \frac{E1}{E2}\,(\text{minimum}) \simeq 0.40$$

## II.2 - FACTEUR D'APLATISSEMENT EN PUISSANCE

### II.2.1 Principe de l'étude :

Nous avons adopté le même schéma d'étude que pour le facteur d'aplatissement en DPA.

Le critère de minimisation du facteur d'aplatissement en puissance est :

"Egalité des puissances maximales des deux zones".

En effet le facteur d'aplatissement est le rapport de la puissance maximale sur la puissance moyenne, celle-ci pour une puissance et un volume donnés est pratiquement constante. Le facteur d'aplatissement dépend donc uniquement de la puissance maximale.

Si on considère une configuration où l'égalité des puissances maximales des deux zones n'est pas respecté, on conçoit facilement qu'il est toujours possible, en modifiant quelque peu les caractéristiques de chacune des zones, de se ramener à l'égalité des puissances et ainsi d'abaisser le maximum.

II.2.2 Résultats :

Les figures n°16 et 17 représentent les enveloppes des minimums du facteur d'aplatissement en puissance, pour différents volumes du coeur et pour les deux concepts.

On remarque que l'on obtient le même réseau de courbes ; les tendances sont les mêmes :

- Les plages d'optimums sont relativement plates.

- Le facteur d'aplatissement s'améliore quand le volume augmente.

Par contre, les courbes des deux concepts sont décalées. Le concept Enrichissements variables donne de meilleurs résultats quelque soit le volume coeur. En absolu, le facteur d'aplatissement s'améliore de 0.05 soit un gain d'environ 5 %.

II.2.2 Interprétation

Le détail de l'interprétation est indiqué en annexe II.2

1/ Le critère de minimisation du facteur d'aplatissement en puissance est l'égalité des puissances maximales des deux zones, ce qui se traduit par :

$$P_1^{max} = P_2^{max}$$

$$\sum_1^P \Phi_1^{max} = \sum_2^P \Phi_2^{max}$$

avec $\sum^P$ section macroscopique de puissance

et $\Phi^{max}$ flux maximum

$$\sum^P \simeq \sum_i N_i \left(\sigma_i^C E_i^C + \sigma_i^f E_i^f\right)$$

$N_i$ = concentration de l'isotope i

$\sigma_i^C$ = section microscopique de capture de l'isotope i

$\sigma_i^f$ = section microscopique de fission de l'isotope i

$E_i^c$ = Energie dégagée par capture de l'isotope i

$E_i^f$ = Energie dégagée par fission de l'isotope i

En pratique $\phi_1^{max}$ = flux au centre = $\phi$ (o)

et $\phi_2^{max}$ = flux à l'interface = $\phi$ (int)
coeur1 - coeur2

La condition d'optimum est donc :

$$\frac{\phi \text{ (int)}}{\phi \text{ (o)}} = \frac{\sum_1^P}{\sum_2^P}$$

2/ $\frac{\phi \text{ (int)}}{\phi \text{ (o)}}$ caractérise la courbure du flux dans la zone interne. Essayons de représenter ce rapport par une relation analytique.

Pour cela exprimons le flux, en résolvant l'équation de la diffusion à 1 groupe d'énergie pour un coeur nu à deux zones en géométrie cylindrique. Nous obtenons :

- Une relation critique liant les laplaciens matières des deux zones $B_1$ et $B_2$.

- L'expression $\frac{\phi \text{ (int)}}{\phi \text{ (o)}} = J_o (B_1 R_i)$
avec $R_i$ = Rayon du coeur 1.

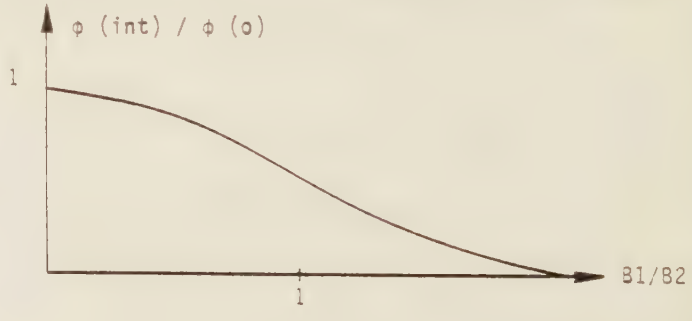
La courbure du flux dans la zone interne est donc seulement fonction de son rayon et de son laplacien matière.

Pour une configuration géométrique donnée ($R_i$ fixés), à chaque valeur de $B_1$ correspond une seule valeur de $\phi$ (int)/$\phi$ (o).

Si l'on néglige l'influence des coefficients de diffusion (voir l'annexe II.2), la condition critique relie à chaque valeur de $B_1$, une seule valeur de $B_2$ ($B_2$ variant en sens inverse de $B_1$).

Pour un découpage géométrique fixé, il existe donc une courbe unique reliant $\phi$ (int)/$\phi$(o) au rapport $B_1/B_2$.

Cette courbe est du type :



3/ Comment exprimer $\Sigma^P_1 / \Sigma^P_2$ en fonction de $B_1/B_2$ ?

Si l'on considère un combustible uniquement constitué d'Uranium 238 et de Plutonium 239, nous pouvons écrire :

$$\Sigma^P = AN_8 + CN_9 \quad \text{avec } A = \sigma_8^C \; E_8^C + \sigma_8^f \; E_8^f$$

$$\text{et } C = \sigma_9^C \; E_9^C + \sigma_9^f \; E_9^f$$

de même

$$DB^2 = \sigma_8^+ \; N_8 + \sigma_9^+ \; N_9$$

$$= EN_8 + FN_9$$

qui traduit le bilan neutronique avec

$$\sigma^+ = \nu \sigma^f - (\sigma^C + \sigma^f)$$

D coefficient de diffusion

Considérons trois cas, en négligeant les coefficients de diffusion

Ⓐ Considérons un combustible constitué uniquement de Plutonium 239

$$\frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2$$

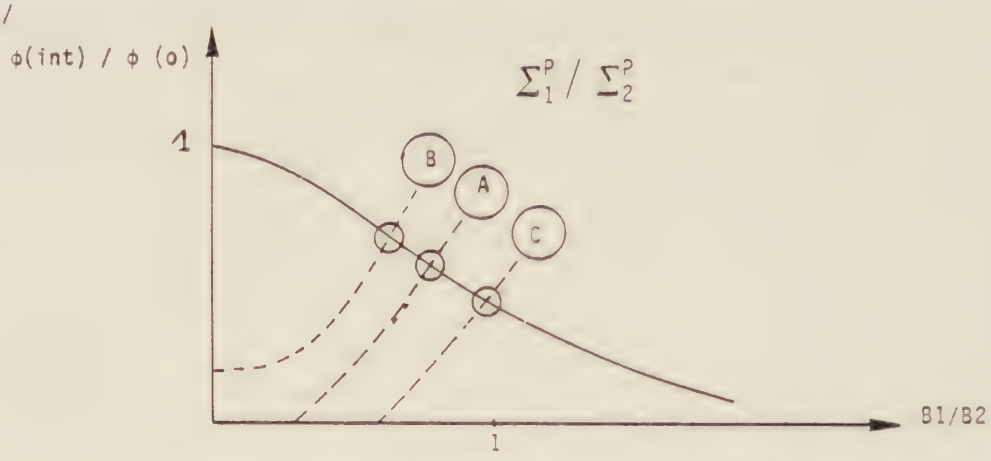
Ⓑ Combustible Pu9 + U8 dans coeur1
Pu9 seul dans coeur2

$$\frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 + \alpha \qquad \alpha = \left(\frac{A}{C} - \frac{E}{F}\right) N_1^8 \quad > 0$$

Ⓒ Combustible Pu9 dans coeur1
Pu9 + U8 dans coeur2

$$\frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 - \beta \qquad \beta > 0$$

Représentons sur une même courbe les variations de $\phi$ (int) / $\phi$ (o) et de $\Sigma_1^p / \Sigma_2^p$ en fonction de $B_1/B_2$/




Nous constatons que l'on obtient un meilleur facteur d'aplatissement pour le cas (B) ensuite (A) et (C) .

En effet, dans le cas (B) on réalise l'égalité des puissances maximales, avec un rapport $\phi$ (int) / $\phi$ (o) plus proche de 1, ce qui signifie un flux plus plat dans la zone interne.

Cette amélioration provient de la présence, dans le coeur1, de l'Uranium 238 qui se caractérise par :

- Une contribution non négligeable au dégagement de puissance

- Un bilan neutronique négatif $\nu \sigma^f - (\sigma^f + \sigma^C) < 0$

Ces deux "qualités" vont exactement dans le sens que l'on recherche pour aplatir la nappe de puissance, car elles tendent à augmenter $\Sigma_1^p$ et à diminuer $\phi$ (o)

On a donc tout intérêt à favoriser la concentration en Uranium 238 dans la zone interne et par contre à la minimiser (l'effet étant inverse) dans la zone externe. Pour cela on recherchera un fort pourcentage volumétrique combustible dans le coeur1 et inversement un faible pourcentage dans le coeur2.

Si l'on examine les deux concepts homogènes classiques sous cet aspect, les différences constatées s'expliquent. En effet :

- dans le concept à Compositions variables : XC1 < XC2

- dans le concept à Enrichissements variables : XC1 = XC2

Le concept "Enrichissement variable" est plus proche de la règle optimale (XC1 >> XC2) sans pour autant la réaliser pleinement, ce qui explique sa plus grande capacité à aplatir la nappe de puissance.

Pour illustrer ce phénomène, il était intéressant de comparer les deux concepts classiques à un concept remplissant la règle optimale c'est-à-dire XC1 >> XC2.

Il est évident que l'on ne peut pas conserver un enrichissement unique pour un tel coeur, on différencie donc les pourcentages combustibles et les enrichissements : c'est le concept hybride.

Pour une même géométrie et pour les trois concepts :

① Concept Compositions variables
② Concept Enrichissements variables
③ Concept Hybride

on détermine des coeurs de même réactivité et optimisés au minimum du facteur d'aplatissement en puissance.

Les caractéristiques de ces trois coeurs sont indiquées dans le tableau n° 13.

Cette comparaison donne les résultats suivants :

| | Xc variable ① | E variable ② | Hybride ③ |
|---|---|---|---|
| Keff | 1.00028 | 1.00014 | 1.00062 |
| $\gamma$ puissance | 1.23 | 1.17 | 1.12 |
| $\gamma$ DPA | 1.31 | 1.21 | 1.14 |
| $\phi$ (o)/ $\phi$(int) | 0.72 | 0.80 | 0.87 |

Ces résultats confirment le raisonnement précédent.

Le concept hybride se révèle meilleur, non seulement pour les facteurs d'aplatissement mais également pour les gains de régénération, la Masse critique et la perte de réactivité, comme on le voit sur le tableau suivant :

| | XC variable | E variable | Hybride |
|---|---|---|---|
| GRI | - 0.11 | - 0.09 | - 0.09 |
| GRT | + 0.04 | + 0.07 | + 0.08 |
| Masse critique (tonnes) | 6.34 | 6.11 | 5.92 |
| $\Delta$K (pcm/jepp) | - 5.2 | - 3.2 | - 1.8 |

Le concept hybride a des limites évidentes. En effet un des problèmes liés au concept Enrichissements variables est le basculement de puissance, au cours de l'évolution du combustible, à cause des enrichissements différents. Ce phénomène est encore plus accentué pour le concept hybride.

Le concept compositions variables offre l'avantage d'avoir des nappes de flux et de puissance particulièrement stables à cause de l'enrichissement unique.

Ce problème de basculement de la nappe de puissance est illustré par la comparaison des gains de régénération des deux zones :

| | XC variable | E variable | Hybride |
|---|---|---|---|
| GRI (coeur1) | - 0.059 | + 0.014 | + 0.064 |
| GRI (coeur2) | - 0.047 | - 0.105 | - 0.152 |
| $\gamma$ p(o) | 1.23 | 1.17 | 1.12 |
| $\gamma$ p(F.C) | 1.25 | 1.35 | 1.49 |
| $\gamma$ DPA (o) | 1.31 | 1.21 | 1.14 |
| $\gamma$ DPA (F.C) | 1.26 | 1.39 | 1.49 |

A titre d'ilustration il est possible d'atténuer ce problème de basculement en choisissant un corps répondant aux mêmes caractéristiques que l'Uranium 238 (Bilan neutronique négatif et contribution au dégagement de puissance non négligeable) mais n'engendrant pas d'atomes fissiles, sources du décalage des gains de régénération des deux coeurs.

A partir du tableau suivant :

| | $(\sigma^c E^c + \sigma^f E^f)$ barn MeV | $\sigma^+$ |
|---|---|---|
| U 238 | 11 | - 0.15 |
| Np 237 | 84. | - 0.19 |
| Np 239 | 29. | - 0.96 |
| Pu 238 | 173. | + 1.31 |
| Am 241 | 71. | - 0.30 |

L'Am 241, par exemple, se révèle intéressant.

Pour la même géométrie que les cas précédents, on réalise une configuration où le coeurl est "dopé" à l'Am 241. (la teneur en AM241 est multiplié par 20).

Nous obtenons des résultats équivalents en cas hybride précédemment étudié.

| | Cas "hybride | Cas "dopage" |
|---|---|---|
| Yp | 1.125 | 1.129 |
| GRI (C1) | + 0.06 | - 0.10 |
| GRI (C2) | - 0.15 | - 0.11 |

L'égalité des gains de régénération assure une stabilité de la nappe de puissance identique au concept "compositions variables".

En conclusion et indépendamment des volumes du coeur, si les deux concepts homogènes classiques se révèlent équivalents pour l'aplatissement en DPA, l'Enrichissement variable est mieux adapté pour l'aplatissement en puissance et cela à cause d'une meilleure répartition géométrique de l'Uranium 238.

Cette constatation a permis de définir un concept hybride, typiquement adapté à l'aplatissement de la nappe de puissance, favorisant la concentration de l'Uranium 238 dans la zone interne au détriment de la zone externe. Des comparaisons préliminaires montrent que ce concept hybride donne également de meilleurs résultats sur la Masse critique, les gains de régénération et la perte de réactivité. Toutefois, son principal défaut réside dans la grande instabilité de la nappe de puissance au cours de l'évolution du combustible. Ce phénomène, déjà gênant pour le concept à Enrichissement variable se trouve ici particulièrement accentué.

## III - COEUR HETEROGENE /12/

### III.1 Présentation

Dans le cadre de la recherche de gains de régénération élevés ou plus exactement dans le cadre de la recherche de temps de doublement courts, a été étudié un concept de coeur comportant des zones fertiles à l'intérieur des zones fissiles, le concept hétérogène.

En dehors, des effets de spectre, liés à la structure hétérogène, qui tendent à : /10/ /15/

- Une augmentation significative de la capture de l'Uranium 238 et de la fission du Plutonium 239.

- Une diminution importante de la capture du Plutonium 239.

L'augmentation du gain de régénération global dans la configuration hétérogène découle principalement du remplacement des captures stériles de l'acier et du sodium par des captures

utiles de l'Uranium 238. En effet, le remplacement des zones fissiles par des zones fertiles de plus grand pourcentage volumétrique combustible (le diamètre des pastilles fertiles n'étant pas limité par la même butée en puissance linéaire que le combustible) augmente la concentration en Uranium au détriment de l'Acier-Sodium /14/.

Mais l'aspect qui nous intéresse plus particulièrement ici est que compte-tenu de la possibilité de répartir les zones fertiles à l'intérieur du coeur, il est possible de réaliser de cette façon un remarquable aplatissement de puissance qui rend tout à fait inutile le recours à des zones fissiles d'enrichissement différent.

Axialement, il est possible d'intercaler dans les colonnes fissiles des aiguilles elles-mêmes, des lits de pastilles fertiles. Comme pour les concepts précédemment étudiés on ne s'intéressera qu'à l'aspect radial où l'on introduira des couronnes concentrentiques et d'épaisseur convenable d'assemblages fertiles.

Il faut noter que compte-tenu de l'utilisation d'un combustible unique dans tout le coeur, l'aplatissement en DPA et en puissance sont équivalents. L'aplatissement en DPA caractérisant plutôt le flux neutronique rapide, l'aplatissement en puissance accordant un "poids" plus important aux flux neutroniques plus lents.

Il est possible de caractériser un coeur hétérogène par son coefficient d'hétérogénéité défini comme le rapport du volume fertile interne sur le volume fissile dans le coeur.

III.2 Principe de l'étude

La technique d'aplatissement dans le concept hétérogène consiste à implanter des zones fertiles à l'endroit des maximums de puissance. On améliore l'aplatissement, en partant du cas le plus simple avec une seule zone fertile au centre du coeur, en augmentant le nombre de couronnes fertiles.

Nous avons abordé cette étude, en se restreignant tout d'abord aux deux configurations suivantes :

- 1 pavé fertile central + 1 couronne

- 1 pavé fertile central + 2 couronnes

Le volume du pavé étant fixé à 2 % du volume total.

Pour un volume de coeur fixé, on détermine la position de ou des couronnes fertiles qui minimise le facteur d'aplatissement et cela pour différentes valeurs du coefficient d'hétérogénéité.

Comme pour les concepts homogènes, on constate que les facteurs d'aplatissement en puissance et en DPA sont peu sensibles à une variation du pourcentage volumétrique combustible (XC) ou de l'enrichissement (E) (voir tableau n° 14). Ceci permet de ne pas recaler systématiquement en réactivité les coeurs étudiés.

III.3 Résultats

Les enveloppes des minimums du facteur d'aplatissement en puissance, pour les deux configurations, sont indiquées figures n° 18 et 19.

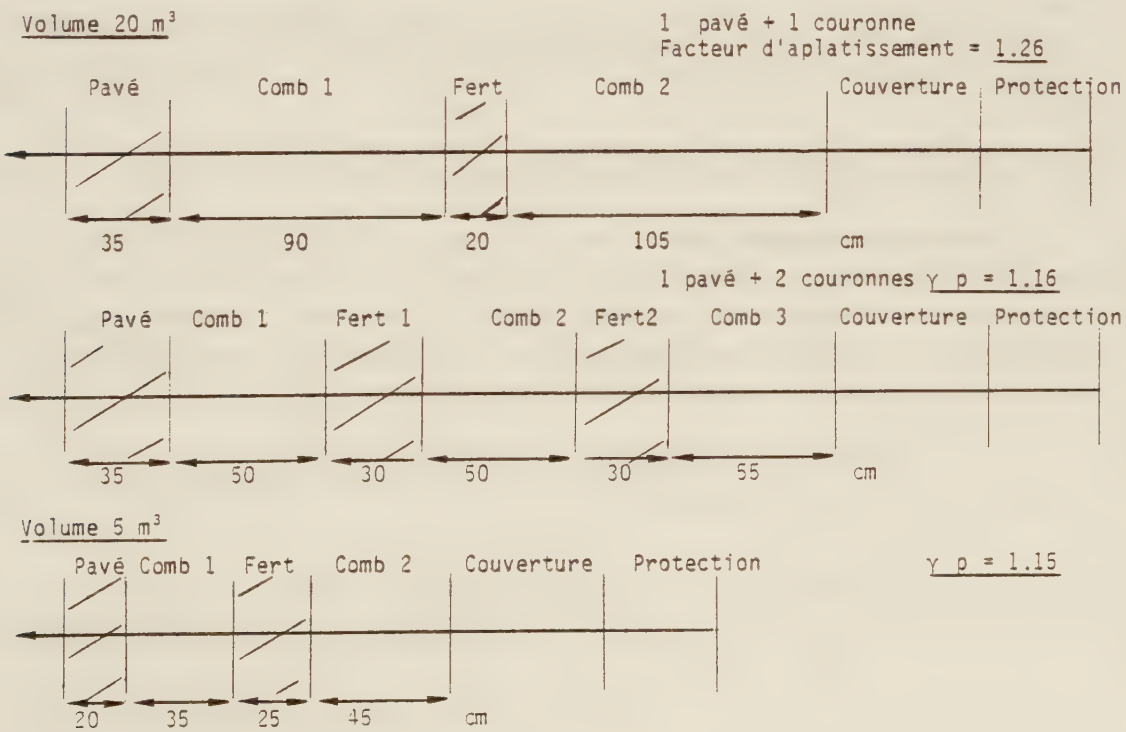
On constate que :

- Le facteur d'aplatissement est très sensible à la variation du volume coeur et qu'il s'améliore quand celui-ci diminue.

On observe une amélioration très rapide de l'aplatissement en fonction du coefficient d'hétérogénéité, puis une stabilisation.

Pour un volume coeur de 20 $m^3$, dans la configuration 1 pavé + 1 couronne, on constate même une dégradation du facteur d'aplatissement. Quand on modifie le volume du pavé central, ce comportement disparait et on retrouve une courbe "typique"(figure n° 20). Il en est de même quand on passe à la configuration avec deux couronnes.

Ces variations montrent que plus les couples épaisseur fertile - épaisseur combustible ont de faibles valeurs, meilleur est l'aplatissement. Ceci se vérifie dans le tableau suivant :



Pour un volume coeur de 20 $m^3$, avec la configuration 1 pavé + 2 couronnes, les épaisseurs des zones fertiles et combustibles sont comparables au cas avec une seule couronne pour un volume de 5$m^3$, on constate que les facteurs d'aplatissement sont identiques.

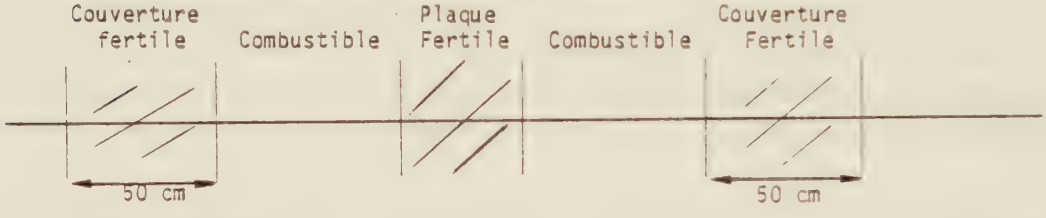
L'aplatissement semble donc ne pas dépendre directement du volume, mais des épaisseurs des zones fertiles et combustibles. Quelque soit le volume, si on conserve des mêmes épaisseurs du couple fertile-combustible, le facteur d'aplatissement n'est pas modifié.

La minimisation du facteur d'aplatissement pour un coeur hétérogène se résume donc à déterminer les épaisseurs optimales du couple fertile-combustible ; Pour constituer le coeur, il suffit alors de répéter en réseau le couple de base optimal.

Pour essayer de déterminer les valeurs optimales des couples épaisseur fertile-épaisseur combustible, nous avons effectué une étude simple à une dimension en géométrie plane.

III.4 Détermination des couples de base optimums

La configuration étudiée en géométrie plane est la suivante :




Pour différentes épaisseurs de combustible, les variations du facteur d'aplatissement en puissance en fonction de l'épaisseur de la plaque, sont indiquées sur la figure n° 21.

On remarque qu'il existe, à chaque épaisseur du combustible, une épaisseur optimale de la plaque, cette valeur optimale est d'autant plus marquée que l'épaisseur du combustible est grande.

Ces courbes montrent, d'une manière qualitative, comment se réalise l'aplatissement :

La perturbation apportée par la zone fertile augmente avec l'épaisseur de cette zone, jusqu'à atteindre la valeur optimale donnant le meilleur aplatissement possible, ensuite une augmentation de l'épaisseur fertile tend à découpler complètement les deux zones combustibles, le facteur d'aplatissement étant alors égal à celui d'un coeur à une seule zone de combustible de même épaisseur.

Sur la figure n° 22 on a porté les valeurs optimales de l'épaisseur de la plaque en fonction de l'épaisseur du combustible.

Bien que l'on ne puisse transposer directement ces valeurs aux résultats de la configuration 1 pavé + 1 couronne en géométrie cyclindrique car il faut tenir compte des passages.

géométrie : plane ⟶ cylindrique
configuration : 1 plaque fertile ⟶ 1 pavé + 2 couronne

On trouve cependant une certaine similitude, comme on le voit sur le tableau n°15, où l'on examine les résultats des coeurs cyclindriques en fonction de l'épaisseur fertile optimale donnée par l'étude en géométrie plane.

Tant que cette valeur optimale n'est pas atteinte, le facteur d'aplatissement s'améliore ensuite, il y a stabilité voire dégradation.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette étude paramétrique ne prétend pas définir des valeurs exactes sur les capacités d'aplatissement des différents concepts étudiés :

- Homogène à Enrichissements variables

- Homogène à Compositions variables

- Hétérogène

car ni l'évolution, ni l'influence des barres de commande ont été directement prises en compte.

En effet, nous avons effectué des comparaisons pour des situations bien précises, à savoir des coeurs en fin de cycle, sans représentation des barres de commande.

Cependant nous nous sommes assurés (voir annexe II.1) que le mouvement des barres de commande, durant le cycle de fonctionnement, influait peu sur les conclusions générales de l'étude qui sont :

Pour l'aplatissement radial en flux, les deux concepts homogènes se révèlent être équivalents.

Par contre, l'avantage est au concept homogène à Enrichissements variables pour l'aplatissement radial de puissance et cela quelque soit le volume du coeur. De cette comparaison, nous avons pu définir un concept "hybride", typiquement adapté à l'aplatissement des nappes de flux et de puissance, ce concept permettant d'obtenir de bien meilleurs facteurs d'aplatissement (gains de 5 % et 10 % par rapport aux deux concepts homogènes classiques).

Quant au concept hétérogène, l'aplatissement se révèle être très sensible à la variation du volume du coeur.

En fait, pour ce concept, l'aplatissement présente la particularité de ne pas dépendre directement du volume mais plutôt des épaisseurs des différentes zones fertiles et combustibles. Ceci rend difficile une comparaison directe avec les concepts homogènes.
On remarque cependant, que le concept hétérogène permet d'atteindre des facteurs d'aplatissement radiaux très faibles, voisins de 1,05

# Conclusion

## CONCLUSION GENERALE

Le but de cette thèse était d'élaborer une méthode simplifiée de calcul neutronique des réacteurs de la filière rapide et de l'appliquer à des problèmes liés aux études "Filières" (Recherche et Développement).

En effet, il était nécessaire de réaliser un outil de calcul spécifiquement adapté aux études neutroniques de type paramétrique car les codes existants étaient soit trop pénalisant du point de vue coût et facilité d'utilisation pour des études de ce type (Code 1D3) soit trop spécifique à un concept de coeur (Code Indigo , travaillant par résolution analytique, à un seul groupe d'énergie, adapté au concept homogène type Super-Phénix).

La réalisation d'un tel outil dénommé code CESAR (code d'Etudes Systématiques Appliquées aux Rapides) constitue la première partie de cette thèse.

La deuxième partie, une étude paramétrique comparant les capacités respectives à aplatir les nappes de flux et de puissance des différents concepts de coeur de la filière rapide permet de donner bien évidemment une illustration des possibilités de ce code, mais surtout de dégager les éléments nécessaires à la conception de coeurs à coût de cycle performant.

## I - LE CODE CESAR

Le choix des caractéristiques de ce code de calcul répond aux objectifs visés à savoir une très grande facilité d'utilisation et un compromis entre le plus faible coût possible et la précision des résultats obtenus.

CESAR calcule, en une dimension géométrique, toutes les grandeurs neutroniques caractéristiques d'un coeur de réacteur (réactivité, flux, puissances, gains de régénération, etc...)

Pour celà, il résout l'équation multigroupe de la diffusion (découpage à six groupes d'énergie).

Les langages informatiques utilisés procurent une grande souplesse tant au niveau de l'évolution du code qu'au niveau des données. La prise en compte de certaines contraintes élémentaires permet d'automatiser et de simplifier les schémas de calcul.

Mais la principale originalité du code réside dans l'utilisation d'une bibliothèque de sections efficaces microscopiques paramétrées en fonction des caractéristiques définissant l'état "neutronique" des différents milieux constituants un coeur de réacteur ; ce qui permet de s'affranchir de recours systématique au code de cellule HETAIRE.

L'élaboration de la bibliothèque a suivi le schéma d'études suivant :

* Détermination des paramètres caractéristiques et de leur domaine de variation pour chaque milieu type constituant un coeur de réacteur.

* Etudes de sensibilité des grandeurs neutroniques aux différentes sections efficaces.

* Etudes de sensibilité des sections efficaces en fonction des paramètres caractéristiques.

* Traduction de ces sensibilités en formules analytiques avec des coefficients appropriés.

* La bibliothèque regroupant toutes ces formules suivant :

  - le type du milieu
  - les isotopes constituants le milieu
  - les différents types de réaction
  - les groupes d'énergie
  - les paramètres caractéristiques du milieu.

Cette bibliothèque est adaptée au cadre des choix technologiques fondamentaux de la filière rapide française à savoir :

* Oxyde mixte $UO_2$-$PuO_2$
* Réfrigérant Sodium
* Acier inoxydable.

Elle est structurée en fonction des différents milieux que l'on rencontre dans un coeur de réacteur :

- Milieu Combustible caractérisé par

  le pourcentage volumétrique combustible (XC)
  l'enrichissement volumétrique en Plutonium (E)

- Milieu Fertile caractérisé par

  le pourcentage volumétrique fertile (XF)

- Milieu Barre, Suiveur de Barre, Protection.

Les domaines de validité étant $XC \in [30\ \%, 45\ \%]$
$E \in [12\ \%, 30\ \%]$
$XF \in [30\ \%, 55\ \%]$

A titre d'exemple, une comparaison entre un calcul de référence (code 1D3) et un calcul CESAR indique les écarts sur les différentes grandeurs neutroniques, introduits par l'utilisation de cette bibliothèque, écarts indiqués dans le tableau ci-dessous. Cette comparaison a porté sur un coeur de type homogène à Enrichissements variables dont les caractéristiques sont extrêmes :

XC = 30 %  E2 = 30 %.

| | 1D3 | Ecart | CESAR | | 1D3 | Ecart | CESAR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Keff(o) | 1.04100 | + 0.17 % | 1.04272 | Keff(F.C) | 1.01628 | + 0.12 % | 1.01752 |
| $\gamma\rho$(o) | 1.3055 | - 0.05 % | 1.3048 | $\gamma\rho$(F.C) | 1.1944 | + 0.11 % | 1.1957 |
| $\gamma_{DPA}$(o) | 1.1932 | - 0.08 % | 1.1922 | $\gamma_{DPA}$(F.C) | 1.2464 | + 0.13 % | 1.2480 |
| GRI(o) | -0.1504 | + 1.5 % | - 0.1527 | GRI(F.C) | -0.1126 | - 1.8 % | -0.1146 |

Coût  1D3 = 80 C.C.U ≃ 250 F. (09/82)
CESAR= 8 C.C.U ≃ 25 F. (09/82)

L'écart sur le facteur de multiplication effectif (Keff) atteint 170 pcm, en ce qui concerne les facteurs d'aplatissement, les écarts sont négligeables (≃ 0.1 %) et sont de l'ordre de 1 à 2 % sur le gain de régénération interne (GRI).

Dans la plage de variation réaliste des différents paramètres, nous avons chiffré les écarts, introduits par la bibliothèque, à ± 100 pcm sur le Keff et moins d'1 % sur les valeurs de flux, puissances et gains de régénération, chiffres tout à fait satisfaisants dans le cadre fixé.

Du point de vue coût, CESAR est inférieur dans un rapport 10 au code de référence actuel 1D3.

Ceci illustre le bon compromis réalisé par le code CESAR entre faible coût et précision des résultats.

## II - ETUDE PARAMETRIQUE

Les facteurs de forme en flux et en puissance, gouvernant directement le temps de séjour en pile des assemblages et la masse critique des coeurs, concernent donc directement l'économie du cycle de combustible.

L'étude réalisée s'est intéressée à déterminer les mérites respectifs dans ce domaine des trois concepts suivants :

- Homogène à Enrichissements variables à deux zones.
- Homogène à Compositions variables à deux zones.
- Hétérogène.

pour une même représentation géométrique simplifiée dont la validitée a été démontrée.

Les tendances dégagées se résument ainsi :

* Pour l'aplatissement radial de flux, les deux concepts homogènes se révèlent être équivalents. Pour toute la gamme de volume coeur étudiée, il est possible d'atteindre pour le facteur de forme, des valeurs très basses d'environ 1.05 ; ceci pour des configurations extrêmes, difficilement réalisables sur le plan pratique, le rapport des enrichissements des deux zones ou des pourcentages volumétriques combustibles étant de l'ordre de 2 (1,3 pour Super-Phénix).

- Par contre en ce qui concerne l'aplatissement radial de puissance, l'avantage est au concept homogène à Enrichissements variables et cela quelque soit le volume du coeur. L'amélioration sur le facteur de forme atteignant 5 % par rapport au concept à compositions variables. Ces résultats ont fait l'objet d'une analyse physique expliquant cette différence à partir de la répartition spatiale de l'Uranium 238.

De cette constatation, nous avons pu définir un concept "hybride", typiquement adapté à l'aplatissement des nappes de flux et de puissance. Son principe est de favoriser la concentration en Uranium 238 de la zone interne au détriment de la zone externe, ainsi il est possible de diminuer d'environ 5 % les facteurs de forme par rapport aux minimums des concepts homogènes. Les inconvénients d'un tel concept sont par contre liés à la grande instabilité des nappes de flux et de puissance au cours de l'évolution du combustible.

Quant au concept hétérogène, l'utilisation d'un combustible unique rend équivalents les facteurs de forme en flux et en puissance. Ces facteurs d'aplatissement sont fortement dépendants de la répartition du fertile interne, de sa quantité et du volume du coeur.

Par contre il semble que la répétition d'un motif alternant une couronne fissile et une couronne fertile permet, en première approximation, de conserver un facteur de forme constant indépendamment du volume. Facteur que l'on optimise en fonction des caractéristiques du motif (épaisseurs respectives des zones fertiles et fissiles).

## III - DEVELOPPEMENTS A VENIR

### 1) Au niveau de l'outil de travail

* un élargissement du domaine d'utilisation du code est à envisager, en particulier, en développant des bibliothèques propres à d'autres types de combustibles tels que U-Pu métallique, carbure ou à d'autres cycles, Uranium-Thorium, par exemple.

* en améliorer la méthode de calcul utilisée, en particulier, on peut penser à une réduction du nombre de groupes d'énergie par l'utilisation de méthodes nouvelles ce qui diminuerait le coût du code.

* en enrichissant le code d'algorithmes permettant la prise en compte de contraintes supplémentaires (butée sur la puissance linéaire maximale,...) ou la recherche d'optimums.

2) L'étude paramétrique réalisée a permis de définir des tendances à mettre en oeuvre pour améliorer les facteurs d'aplatissement en puissance et en flux des coeurs rapides. Il serait intéressant, de fournir aux projeteurs, des résultats semblables pour d'autres paramètres (Gains de régénération, chute de réactivité, temps de doublement...) afin d'aboutir à une carte générale de sensibilité des différentes grandeurs neutroniques aux caractéristiques physiques des coeurs de la filière rapide.

# Annexes

ANNEXE I.1

COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS DECOUPAGES ENERGETIQUES :

I - Principe de l'étude :

Pour les calculs neutroniques, le découpage énergétique à 25 groupes, type HETAIRE, constitue le découpage de référence.

Nous avons tout intérêt, pour des raisons de coût, à choisir un découpage au nombre de groupes le plus réduit possible. Néanmoins, ce découpage réduit ne doit pas donner des résultats trop éloignés du cas de référence à 25 groupes car si le code de calcul CESAR ne prétend pas fournir des résultats exacts en absolu, il faut que les variations relatives soient elles bien représentées.

Dans le but de définir le découpage énergétique le mieux adapté au code CESAR, nous avons comparé les résultats obtenus avec trois découpages différents sur une même étude paramétrique.

Ces trois découpages sont les suivants :

- Le découpage à 25 groupes type HETAIRE qui constitue la référence

- Le découpage à 6 groupes, type projet

- Le découpage à un seul groupe d'énergie

Les condensations de 25 à 6 groupes, puis à 1 groupe ont été effectuées en utilisant comme flux de pondération les flux fondamentaux issus des calculs cellules HETAIRE.

L'étude paramétrique consistait à calculer, en géométrie plane à une dimension, les paramètres neutroniques d'un coeur hétérogène constitué d'une plaque fertile d'épaisseur variable entourée de combustible d'épaisseur fixée à 1 m, les caractéristiques des milieux combustible et fertile étant fixées tout au long de l'étude.

II - Résultats :

L'ensemble des résultats obtenus sur le facteur de multiplication effectif (Keff), les facteurs d'aplatissement en puissance et DPA, et les gains de régénération est indiqué dans le tableau suivant :

| Epaisseur plaque | | 0. | 1. | 2. | 6. | 20. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Keff | | | | | | |
| | 25gr | 1.05462 | 1.04513 | 1.03660 | 1.01150 | 0.98505 |
| | 6gr | 1.05588 | 1.04533 | 1.03588 | 1.00877 | 0.98280 |
| | 1gr | 1.06885 | 1.05230 | 1.03944 | 1.01008 | 0.98847 |
| $p^{max}/\overline{p}$ | | | | | | |
| | 25gr | 1.378 | 1.308 | 1.258 | 1.207 | 1.255 |
| | 6gr | 1.381 | 1.315 | 1.253 | 1.211 | 1.262 |
| | 1gr | 1.349 | 1.249 | 1.214 | 1.210 | 1.255 |
| $DPA^{max}/\overline{DPA}$ | | | | | | |
| | 25gr | 1.385 | 1.306 | 1.268 | 1.235 | 1.279 |
| | 6gr | 1.389 | 1.306 | 1.267 | 1.238 | 1.284 |
| | 1gr | 1.349 | 1.249 | 1.214 | 1.210 | 1.255 |
| G.R | | | | | | |
| Plaque | 25gr | / | +0.015 | +0.030 | +0.078 | +0.138 |
| | 6gr | / | +0.017 | +0.033 | +0.084 | +0.142 |
| | 1gr | / | +0.030 | +0.053 | +0.106 | +0.144 |
| Combustible | | | | | | |
| | 25gr | -0.155 | -0.154 | -0.154 | -0.155 | -0.158 |
| | 6gr | -0.156 | -0.155 | -0.154 | -0.154 | -0.157 |
| | 1gr | -0.162 | -0.162 | -0.162 | -0.162 | -0.162 |

Nous constatons que dans la plupart des cas, le découpage à 6 groupes donne des valeurs en absolu plus proches du cas de référence que le découpage à un seul groupe. Ceci est illustré par le tableau suivant où l'on indique les écarts en pour cent obtenus avec les découpages à 6 et 1 groupes par rapport au 25 groupes.

| Epaisseur plaque cm / % | 0. | 1. | 2. | 6. | 20. |
|---|---|---|---|---|---|
| Keff | | | | | |
| 6G-25G | +0.12 | +0.02 | -0.07 | -0.27 | -0.23 |
| 1G-25G | +1.35 | +0.70 | +0.27 | -0.14 | +0.35 |
| $P^{max}/P$ | | | | | |
| 6G-25G | +0.22 | +0.54 | -0.40 | +0.33 | +0.56 |
| 1G-25G | -2.10 | -4.51 | -3.50 | +0.25 | +0.00 |
| $DPA^{max}/DPA$ | | | | | |
| 6G-25G | +0.29 | 0.00 | -0.08 | +0.24 | +0.39 |
| 1G-25G | -2.60 | -4.36 | -4.25 | -2.02 | -1.38 |
| G.R | | | | | |
| Plaque | | | | | |
| 6G-25G | / | +13. | +10. | +7.7 | +2.9 |
| 1G-25G | / | +100. | +77. | +3.6 | +4.4 |
| Comb | | | | | |
| 6G-25G | -0.65 | -0.65 | 0.0 | +0.65 | +0.63 |
| 1G-25G | -4.52 | -5.20 | -5.2 | -4.5 | -2.5 |

On note que le découpage à 6 groupes permet d'obtenir des résultats très proches du cas de référence, les écarts étant inférieurs à 0.3%, soit 300 pcm, sur le facteur de multiplication effectif (Keff) et 0.5 % sur les facteurs d'aplatissement en puissance et DPA. En ce qui concerne les gains de régénération les écarts sont plus importants, notamment pour la plaque fertile, ceci s'expliquant par les très petites dimensions de cette dernière.

Par contre les écarts 1 groupe-25 groupes peuvent dépasser 1000 pcm sur le Keff et atteindre 5 % sur les facteurs d'aplatissement.

Bien qu'avec le code CESAR nous ne recherchions pas des valeurs exactes, il est évident que si des écarts de l'ordre de 0.5 % sur les paramètres neutroniques sont tout à fait acceptables, des écarts de 5% sont par trop importants et risquent de masquer certains phénomènes.

En effet, ce qui nous intéresse plus particulièrement est de bien représenter les variations des différents paramètres ; les figures N° I.1 et I.2 indiquent les variations du Keff et du facteur d'aplatissement en puissance pour les trois découpages.

Nous constatons que le découpage à 6 groupes donne des courbes de variations analogues au cas de référence, par contre le 1 groupe indique des allures de courbes assez différentes. Ceci est souligné par les écarts relatifs maximums sur les paramètres globaux du coeur, indiqués ci-dessous :

| Ecarts relatifs maximums en % | 6G - 25 G | 1G - 25 G |
|---|---|---|
| Keff | 0.35 | 1.5 |
| $P^{max}/P$ | 0.96 | 4.7 |
| $DPA^{max}/DPA$ | 0.47 | 2.5 |

Ces écarts caractérisent les différences entre les courbes sur l'ensemble du domaine de variation. Nous notons que le découpage à six groupes enregistre des écarts inférieurs à 1 % par contre le découpage à 1 groupe accuse des écarts de plusieurs pourcents allant jusqu'à 5 %.

III - Conclusion

De cette étude il ressort que si le découpage énergétique à six groupes permet d'obtenir des courbes de variation des paramètres neutroniques proches du cas de référence à 25 groupes, à moins d'1 % d'écart ; le découpage à un seul groupe d'énergie présente, lui, des écarts de plusieurs pour cents, et reflète donc assez mal les allures des courbes.

Nous en concluons que le découpage à un seul groupe est par trop imprécis et qu'il est nécessaire de recourir à un découpage multigroupe. Le découpage à six groupes, type projet, apparait comme un bon compromis entre précision et coût, et convient bien de ce fait au code de calcul CESAR.

- Variation du Keff en fonction de l'épaisseur de la plaque fertile.

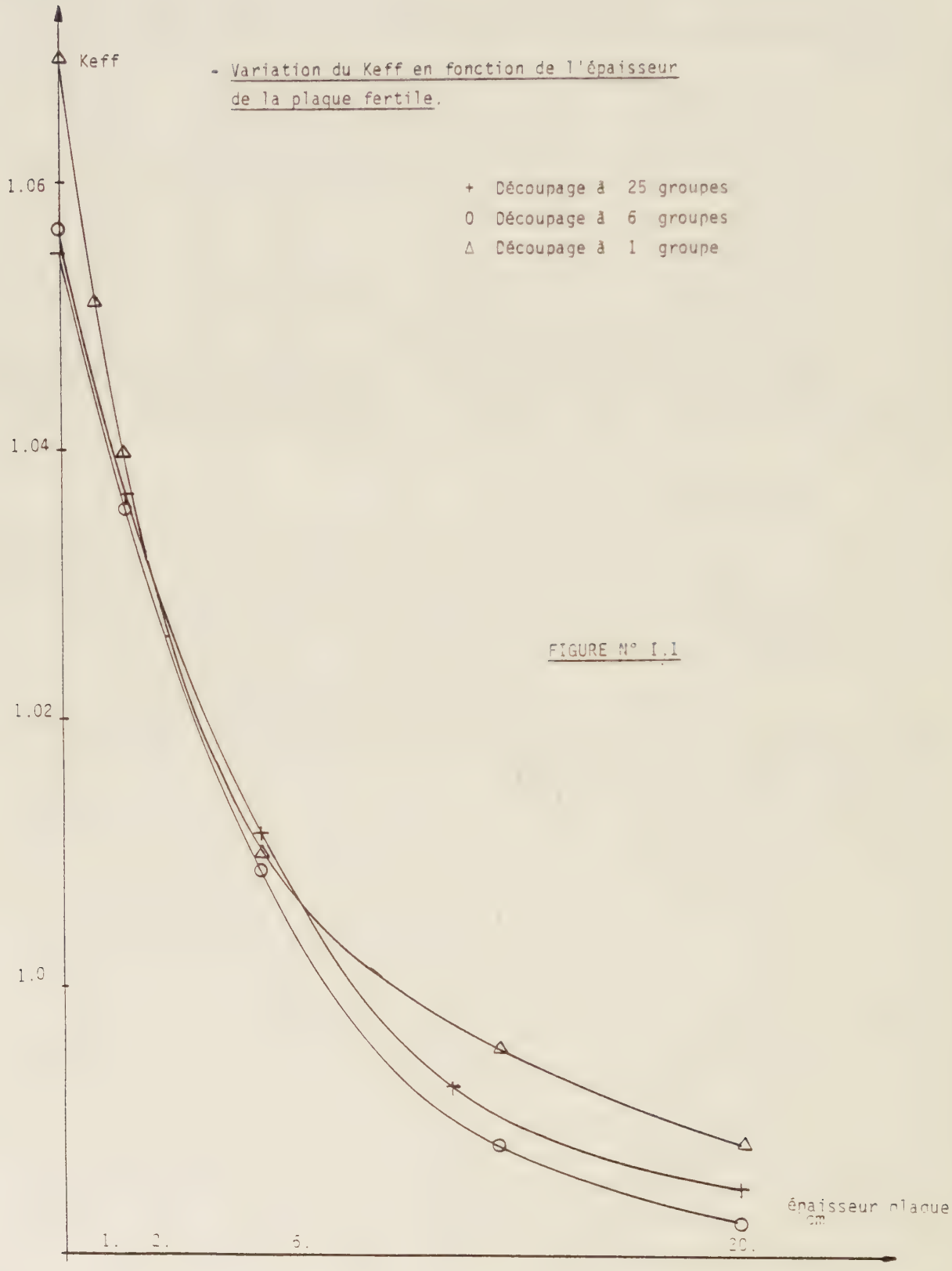
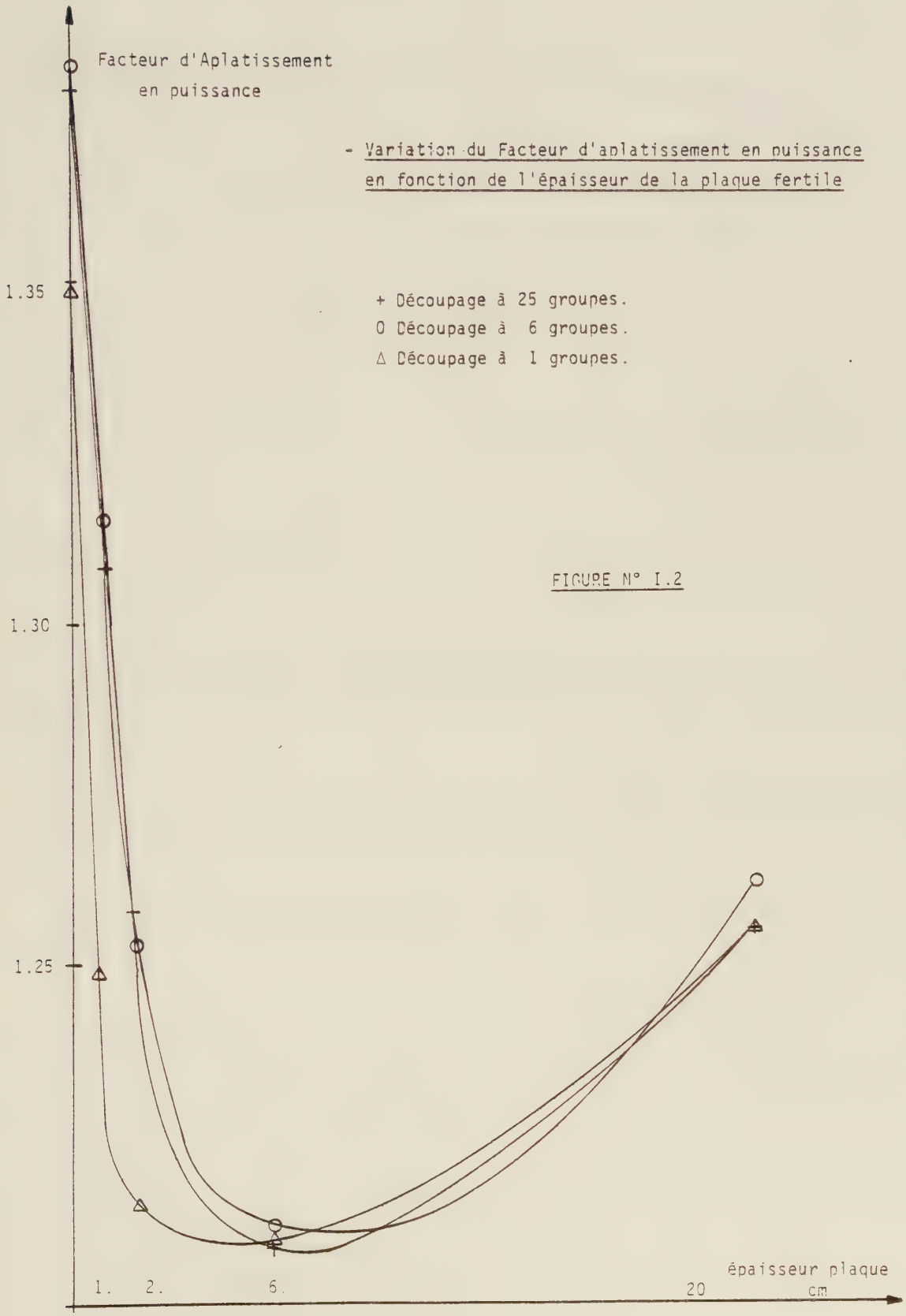



FIGURE N° I.1




- Variation du Facteur d'aplatissement en puissance en fonction de l'épaisseur de la plaque fertile

+ Découpage à 25 groupes.
O Découpage à 6 groupes.
Δ Découpage à 1 groupes.

FIGURE N° I.2

ANNEXE I.2

1 - LA RECHERCHE DU B RADIAL, ASSURANT LA COHERENCE, SE FAIT A PARTIR DES FORMULES SUIVANTES :

1) Effet de la hauteur coeur (Hex = hauteur coeur extrapolée)

$$K'eff = Keff\ (demandé) - \Delta K$$

$$\text{avec } \Delta K = (80.56 * \overline{E} + 3314) * \left[ \frac{1.10^{-3} - (\Pi/Hex)^2}{2.5\ 10^{-4}} \right]$$

2) Evaluation de la réactivité

$$K''eff = (A * \overline{E}) + B$$

Avec A et B interpolés, selon la valeur du pourcentage volumétrique combustible (XC), dans le tableau suivant :

| XC | 45 | 40 | 36.62 | 33 | 30. |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 3479 | 3236 | 3012 | 2795 | 2605 |
| B | 46850 | 45750 | 45900 | 45400 | 45000 |

3) Evaluation B radial

$$B = \left( \frac{K''eff - K'eff}{21} \right) * 10^{-6} + 3.75\ 10^{-4}$$

2 - QUALIFICATION DU COUPLAGE :

Pour tester l'algorithme, une comparaison était nécessaire avec un calcul à deux dimension (code R.Z) et un calcul radial à une dimension (code 1D3).

Ce test a été effectué sur un cœur de type SPX1. Il donne les résultats suivants :

| | Code R.Z | Code (radial) 1D3 | Code CESAR | (couplage) |
|---|---|---|---|---|
| Keff (t=o) | 1.03687 | 1.02992 | 1.02605 | radial |
| Keff (t=F.C) | 1.01375 | 1.00212 | 1.00040 | radial |
| $\Delta\rho$ radial | - 2680 | - 2694 | - 2499 | |
| $\Delta\rho$ (C.A) | + 480 | | + 489 | |

| | | R.Z | 1D3 | CESAR | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta\rho$ (total) | | -2200 | | -2010 | | |
| max/ | t=o | 1.66 | 1.32 | 1.67 | 1.31 | 1.27 |
| $Q/\overline{Q}$ | t=F.C | 1.46 | 1.19 | 1.49 | 1.19 | 1.25 |
| GRI | t=o | - 0.158 | - 0.165 | - 0.156 | | |
| | t=FC | - 0.111 | - 0.121 | - 0.115 | | |
| GCAX | t=o | + 0.250 | | + 0.246 | | |
| | t=FC | + 0.229 | | + 0.215 | | |
| GCRA | t=o | + 0.183 | + 0.154 | + 0.157 | | |
| | t=FC | + 0.158 | + 0.135 | + 0.138 | | |
| GRE | t=o | + 0.423 | + 0.154 | + 0.403 | | |
| | t=FC | + 0.387 | + 0.135 | + 0.353 | | |
| GRT | t=o | + 0.265 | - 0.011 | + 0.247 | | |
| | t=FC | + 0.276 | + 0.014 | + 0.238 | | |

Ce test appelle les remarques suivantes :

(1) Les calculs (R.Z) et (1D3) ont été effectués avec le même jeu de sections efficaces (Bande HETAIRE) à 6 groupes condensés par la méthode de référence). L'écart en réactivité est dû au passage 2D ⟵ 1D.

En ce qui concerne le code CESAR, on utilise la bibliothèque d'où une incertitude de ± 100 pcm, plus l'écart dû au passage 25 groupes - 6 groupes par la méthode non standard. Ce qui explique l'écart de - 400 pcm avec le code 1D classique.

(2) La puissance de normalisation radiale calculée avec le coefficient $\alpha$ est bonne car il y a accord pour la chute de réactivité en 1D3 et RZ.

- 2694 pcm ≒ - 2680 pcm

Par contre la chute de réactivité calculée par CESAR accuse un écart de 200 pcm.

- 2499 pcm au lieu de - 2680 pcm

(3) Avec la procédure de couplage, on calcule bien la contribution des couvertures axiales.

- à la réactivité (489 pcm au lieu de 480 pcm)
- au gain de régénération (Ecarts de - 2% et - 6% à t=o et à t = F.C)

De même sont bien calculés les facteurs de forme.

Globalement les écarts R.Z - CESAR se traduisent par :

| | | |
|---|---|---|
| $\Delta K$ (C.A) | + 2 % | |
| $\Delta K$ | - 7 % | |
| | t = o | t = FC |
| GRE GRI | + 1 % | - 3 % |
| GRE GCAX | -14 % | -13 % |
| GRE GCRA | - 2 % | - 6 % |
| $Q^{max} / \overline{Q}$ | + 0.5% | + 2 % |

La nette différence sur le gain de régénération des couvertures radiales s'explique par le fait que dans le calcul R.Z, on tient compte de la contribution des "coins" c'est-à-dire les parties radiales à hauteur des couvertures axiales, ce que l'on peut évidemment pas faire en géométrie à une dimension.

En conclusion, cette procédure de couplage Axial-Radial permet d'obtenir des résultats comparables à ceux d'un calcul R.Z avec des écarts acceptables (quelques pour cents sur les différents paramètres.)

ANNEXE II.1

PROBLEMES LIES AUX BARRES DE COMMANDE ET A L'EVOLUTION

I - ROLE DES BARRES DE COMMANDE

Les fonctions assurées par les barres de commande concernent :

- La sureté du réacteur ; garantir un arrêt rapide du réacteur dans les cas les plus défavorables,
- Le controle,
- La compensation due à la perte de réactivité résultant de l'évolution du combustible,
- L'aplatissement des distributions de puissance au cours du fonctionnement.

C'est ce dernier aspect qui nous intéresse plus particulièrement.

En tenant compte des différents rôles des barres, la solution adoptée pour Super-Phénix est une répartition des barres de commande en deux rideaux, le premier à l'intérieur du coeur 1, le second à l'interface coeur 1 - coeur 2. (voir figure n° A.1)

Par un mouvement différentiel des deux rideaux, il est possible de maintenir l'égalité des puissances maximales des deux zones tout au long du cycle de fonctionnement et ainsi d'optimiser l'aplatissement de puissance.

Le critère de détermination du rapport des enrichissements est d'obtenir l'égalité des puissances maximales en fin de cycle, les barres de commande étant en position haute c'est-à-dire non insérées dans le coeur.

II - INFLUENCES DES BARRES DE COMMANDE

Dans l'étude paramétrique réalisée, deux problèmes liés aux barres de commande n'ont pas été pris en compte, ce sont :

- L'implantation des barres : La répartition des barres dans le coeur fait l'objet d'études particulières où entrent en jeu les différents rôles des barres et pas seulement l'aplatissement de puissance.

Il n'était donc pas possible de se définir une configuration des barres standard valable pour les différents concepts et les différents volumes de coeur.

Nous avons donc négligé l'influence de cette implantation sur l'aplatissement des nappes de flux et de puissance.

- L'étude a été réalisée sans tenir compte de l'évolution c'est-à-dire que nous avons comparé les qualités intrinsèques de chaque concept à aplatir la distribution de puissance à un instant donné, typiquent en début de vie, les concentrations étant théoriquement fraiches.

Le problème se pose de savoir si les conclusions tirées de cette comparaison sont modifiées si l'on considère l'aplatissement tout au long du cycle.

Dans le paragraphe suivant, nous évaluons et justifions les approximations précédentes.

## III - EFFETS DES APPROXIMATIONS

### a) Effet de la représentation des barres de commande :

Pour les deux concepts homogènes à Enrichissements variables et à compositions variables, on représente sur un coeur, type Super Phénix, l'implantation des barres de commande et on compare les facteurs d'aplatissement aux configurations sans barre .

Caractéristiques géométriques du coeur étudié :

Rayon coeur = 185 cm
Volume coeur 1 / Volume coeur 2 = 1.1

Deux rideaux de barres aux emplacements de SPX1.
La représentation géométrique est indiquée figure N° A.2

Concept Enrichissements variables :

| | $\gamma$ p | $\alpha$ = E1,E2 |
|---|---|---|
| Avec Barres | 1,204 | 0.805 |
| Sans Barre | 1,20 | 0.820 |

Concept Compositions variables :

| | $\gamma$ p | $\alpha$ = XC1/XC2 |
|---|---|---|
| Avec Barres | 1,241 | 0.765 |
| Sans barre | 1,24 | 0.775 |

On constate :

Que la prise en compte de l'emplacement des barres de commande ne modifie en rien les valeurs minimales du facteur d'aplatissement. Par contre les valeurs des rapports $\alpha$ optimums sont, elles, décalées.

b) Effet de la prise en compte du mouvement différentiel des barres de commande :

1. Concept Enrichissements variables

Les études réalisées pour SPX1 /11/ ont montré que le mouvement différentiel des barres avait une faible influence (environ 2% à 3 %) sur la valeur en fin de cycle du facteur d'aplatissement en puissance. De ce fait, une étude à une dimension, sans mouvement de barres, suffit pour déterminer le rapport des enrichissements initiaux, respectant le critère d'égalité des puissances maximales en fin de cycle.

Pour le même coeur décrit qu'en a) nous avons comparé le cas avec mouvement différentiel de barres au cas avec les barres fixées en positions hautes.

Les résultats sont indiqués dans les tableaux suivants : ainsi que les nappes de puissances (figures N° A.3, A.4, A.5)

1. Barres fixées en position hautes : $\frac{E1}{E2} = 0.78$

| t | Keff | ΔK | $q_1^{max}$ | $q_2^{max}$ | $q\frac{max}{\bar{q}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0. | 1.06343 | 4146 | 302. | 351. | 1,26 |
| 450 jepp | 1.02197 | | 333. | 332. | 1,19 |

(fin de cycle)

2. Mouvement différentiel de barres : $\frac{E1}{E2} = 0.78$

| t | Keff | ΔK | $q_1^{max}$ | $q_2^{max}$ | $q\frac{max}{\bar{q}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0. | 1.02569 | 4103 | 320. | 316. | 1.15 |
| F.C | 0.98466 | | 338. | 291. | 1.23 |
| F.C | 1.02178 | | 336. | 334. | 1.21 |

(barres remontées)

rem : Ces calculs ont été réalisés en effectuant une dilution homogène des barres.

On constate que :

- Premièrement le calcul d'évolution, sans mouvement de barres, suffit à déterminer le rapport des enrichissements initiaux adéquat et la valeur du facteur d'aplatissement de puissance en fin de cycle, conformément au principe énoncé plus haut.

- Deuxièmement le fait d'aplatir la nappe de puissance par le mouvement de barres améliore le facteur d'aplatissement au cours du cycle d'environ 5 %, par rapport au facteur d'aplatissement fin de cycle.

Il faut noter que globalement cette amélioration de l'aplatissement radial est compensée par une dégradation de l'aplatissement axial dûe à l'enfoncement des barres.

3. Concept Compositions variables :

On reprend la géométrie utilisée pour le concept à Enrichissements variables et on compare un calcul avec mouvement de barres à un calcul avec les barres en positions hautes.

3.1 Evolution barres hautes :

Le critère "Egalité des puissances maximales" impose un rapport des pourcentages volumétriques combustible coeur 1 sur coeur 2 égal à 0.805 en début de vie. Les résultats de cette évolution sont indiqués dans le tableau suivant : $\frac{XC1}{XC2} = 0.805$

| t | Keff | ΔK | $q_1^{max}$ | $q_2^{max}$ | $q\frac{max}{\bar{q}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0. | 1.04669 | 4579 | 393. | 326. | 1.41 |
| F.C | 1.00090 | | 338. | 339. | 1.22 |

Pour le même rapport des pourcentages volumétriques combustible, l'évolution avec mouvement de barres donne les résultats suivants :

| t | Keff | ΔK | $q_1^{max}$ | $q_2^{max}$ | $q\frac{max}{\bar{q}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0. | 1.02450 | 4276 | 334. | 328. | 1.20 |
| F.C | 0.98174 | | 318. | 333. | 1.21 |
| F.C | 1.00281 | | 377. | 335. | 1.36 |

(Barres hautes)

On constate que l'on ne retrouve pas l'égalité des puissances volumétriques maximales après évolution avec mouvement des barres. Ceci provient du fait que la répartition géométrique

des barres de commandes utilisée est mal adaptée à ce concept. En effet, contrairement au concept Enrichissements variables, les gains de régénération des deux coeurs sont ici très voisins, l'évolution de la nappe de puissance est donc différente. L'influence du mouvement de barres est différente.

Pour obtenir l'égalité des puissances maximales en fin de cycle avec mouvement de barres, il faut diminuer le rapport des pourcentages volumétriques combustible coeur 1 sur coeur 2.

Avec un rapport $\frac{XC1}{XC2} = 0.77$ on obtient :

Evolution Barres hautes

| t | Keff | ΔK | $q^{max}_1$ | $q^{max}_2$ | $q^{max}/q$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1.04265 | 4410 | 354. | 343. | 1.27 |
| F.C | 0.99855 | | 313. | 353. | 1.27 |

L'égalité des puissances maximales n'est pas respectée

| t | Keff | ΔK | $q^{max}_1$ | $q^{max}_2$ | $q^{max}/q$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0. | 1.00108 | 4141 | 325. | 329. | 1.18 |
| F.C | 0.95967 | | 308. | 335. | 1.22 |
| F.C | 0.99951 | | 345. | 348. | 1.26 |

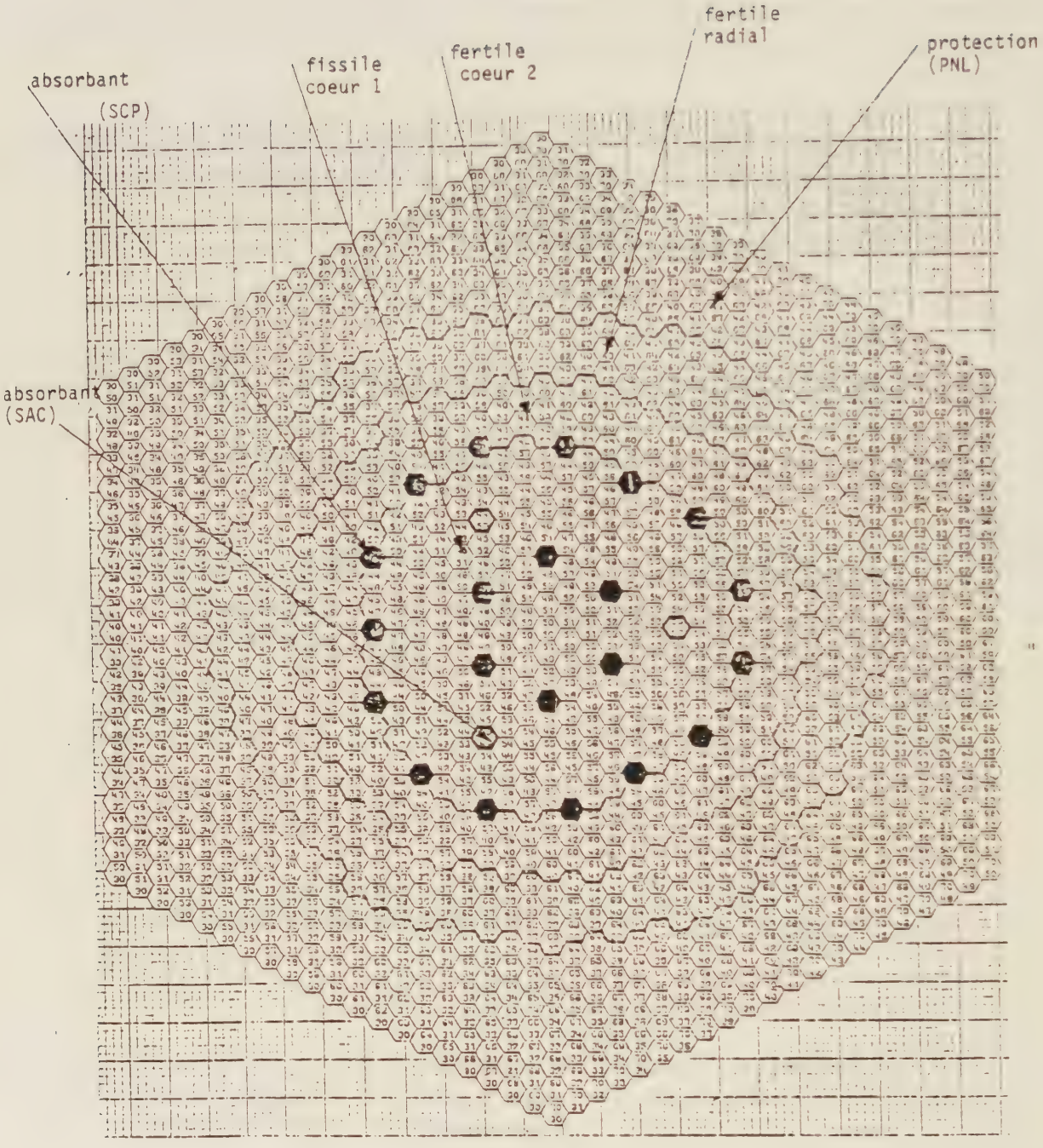
(Barres remontées)

Les nappes de puissance sont indiquées (figures N° A.6, A.7, A.8, A.9, A.10)

On constate le même effet que pour le concept à Enrichissements variables, c'est-à-dire que le fait d'aplatir la nappe de puissance, tout au long du cycle, par un mouvement de barres approprié améliore le facteur d'aplatissement d'environ 5 % par rapport au facteur optimal fin de cycle.

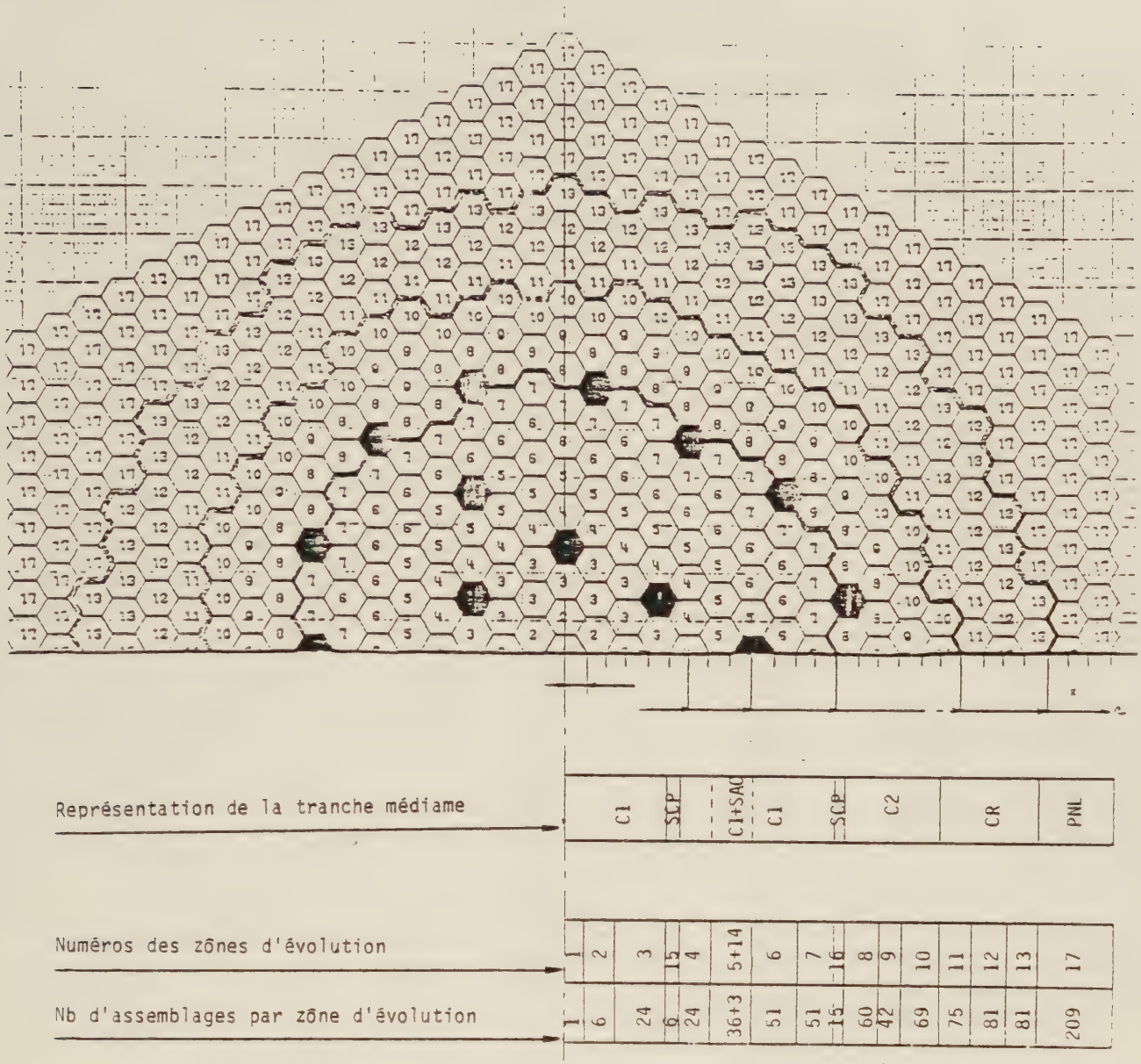
En conclusion, la prise en compte de la répartition géométrique des barres de commandes ne modifie pas la valeur du facteur d'aplatissement. En ce qui concerne l'influence du mouvement différentiel des barres, on constate le même effet pour les deux concepts.

Ainsi les conclusions tirées de l'étude paramétrique sur des coeurs frais restent vraies si l'on considère l'ensemble du cycle de fonctionnement.




PLAN DU COEUR POUR LES CALCULS NEUTRONIQUES

FIGURE N° .A.1




CYLINDRISATION DU COEUR T = 20°C

FIGURE N°A.2

FIGURE N° A.3

MOUVEMENT DE BARRES t = 0

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{E1}{E2}$ = 0.78

PUISSANCE MAX = 3.19507E+02

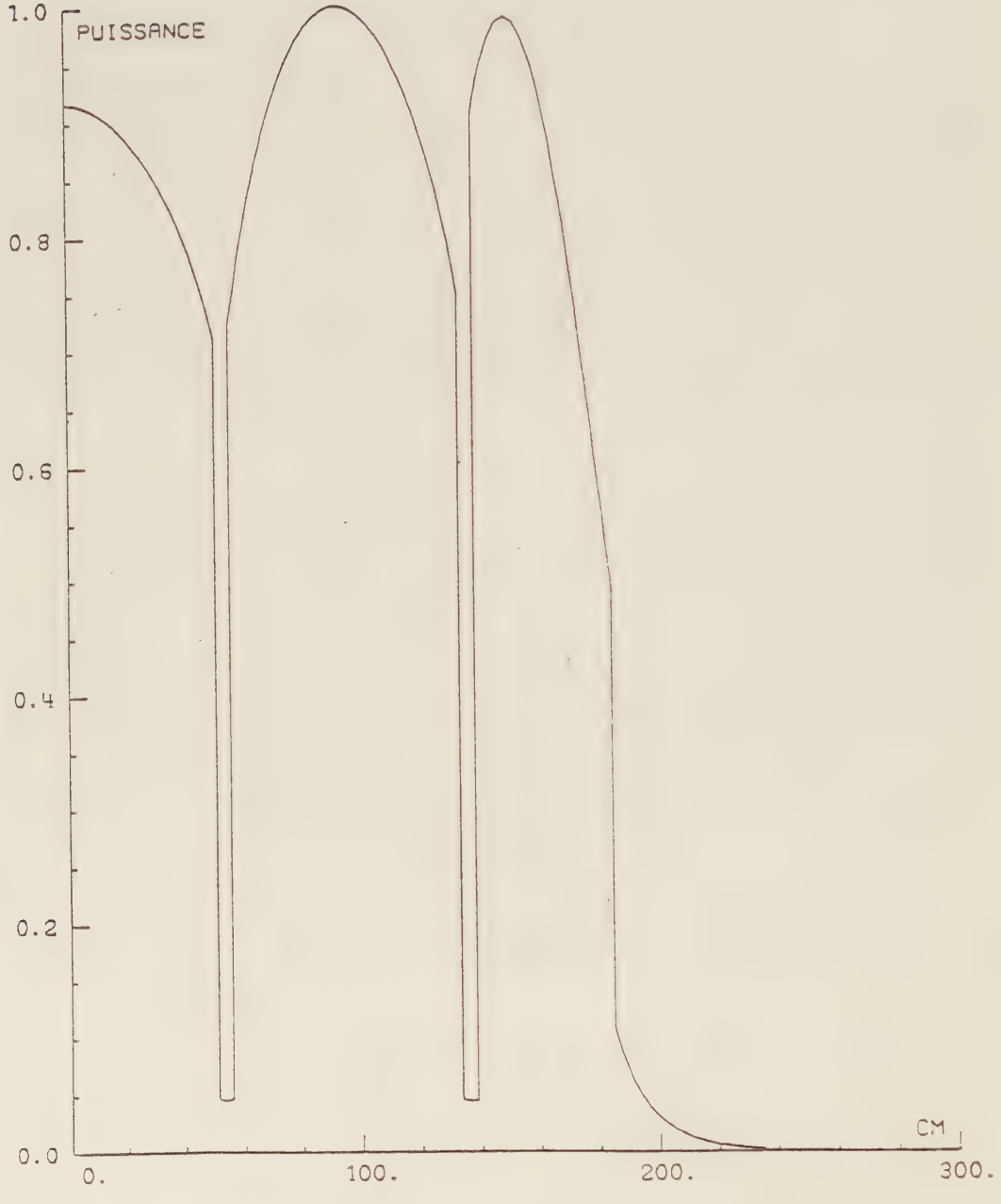


FIGURE N° A.4

MOUVEMENT DE BARRES t = F.C

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{E1}{E2}$ = 0.78

PUISSANCE MAX = 3.38241E+02

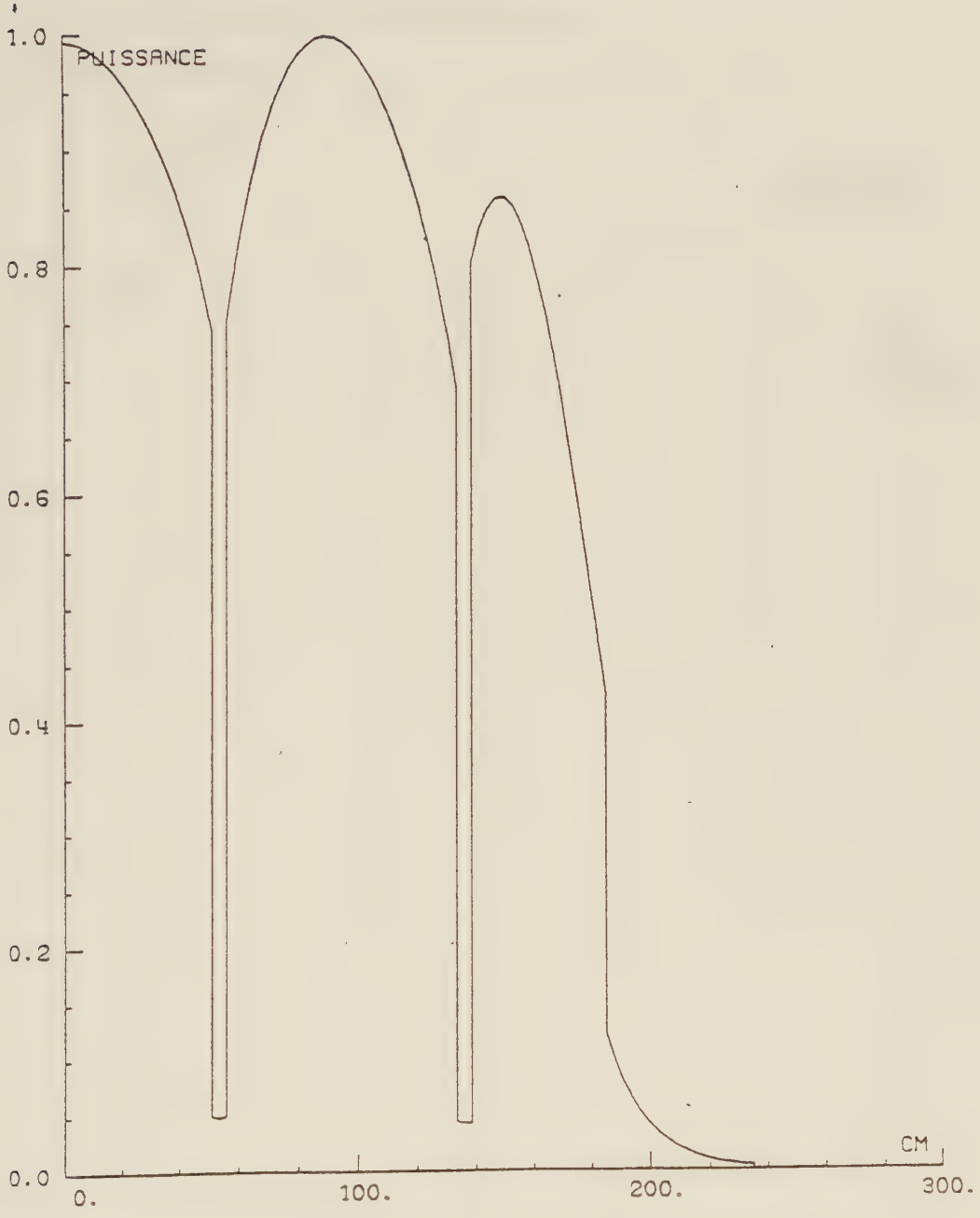


FIGURE N° A.5

MOUVEMENT DE BARRES - BARRES REMONTEES t = FC

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{E1}{E2}$ = 0.78

PUISSANCE MAX = 3.36145E+02

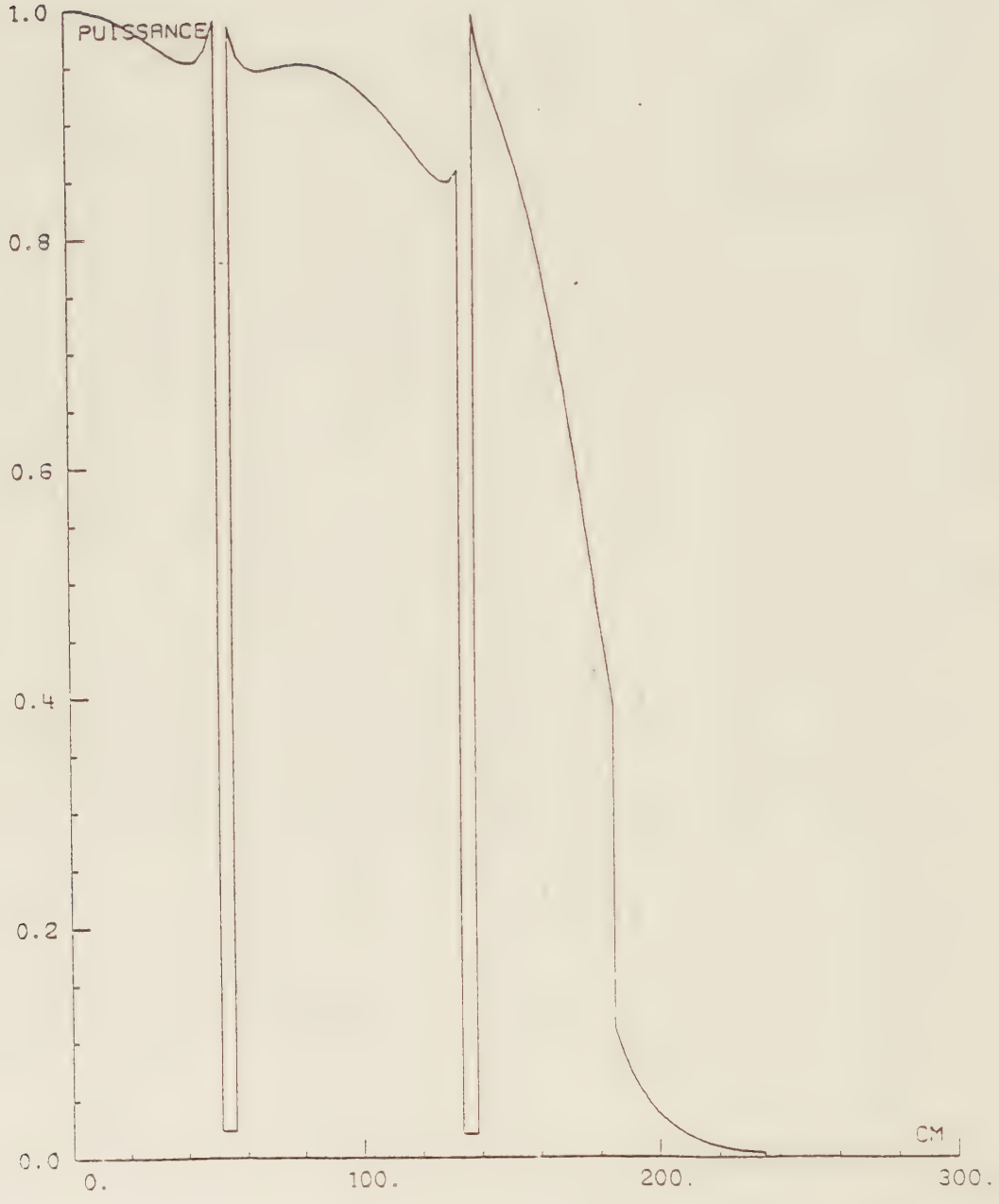


FIGURE N° A.6

POSITIONS HAUTES t = 0

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{XC1}{XC2}$ = 0.77

PUISSANCE MAX = 3.54336E+02

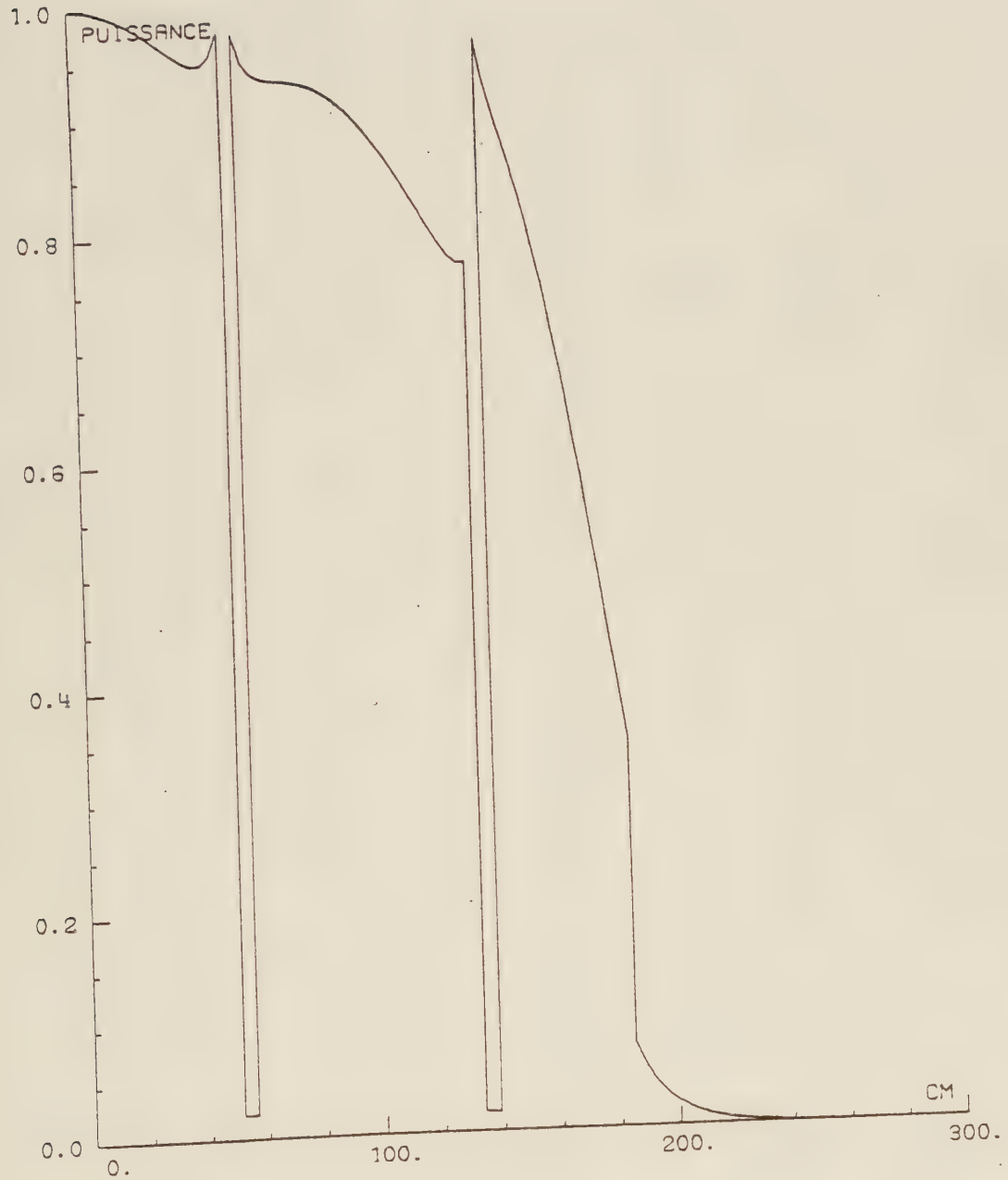


FIGURE N° A.7

BARRES POSITIONS HAUTES t = F.C

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{XC1}{XC2} = 0.77$

PUISSANCE MAX = 3.52931E+02

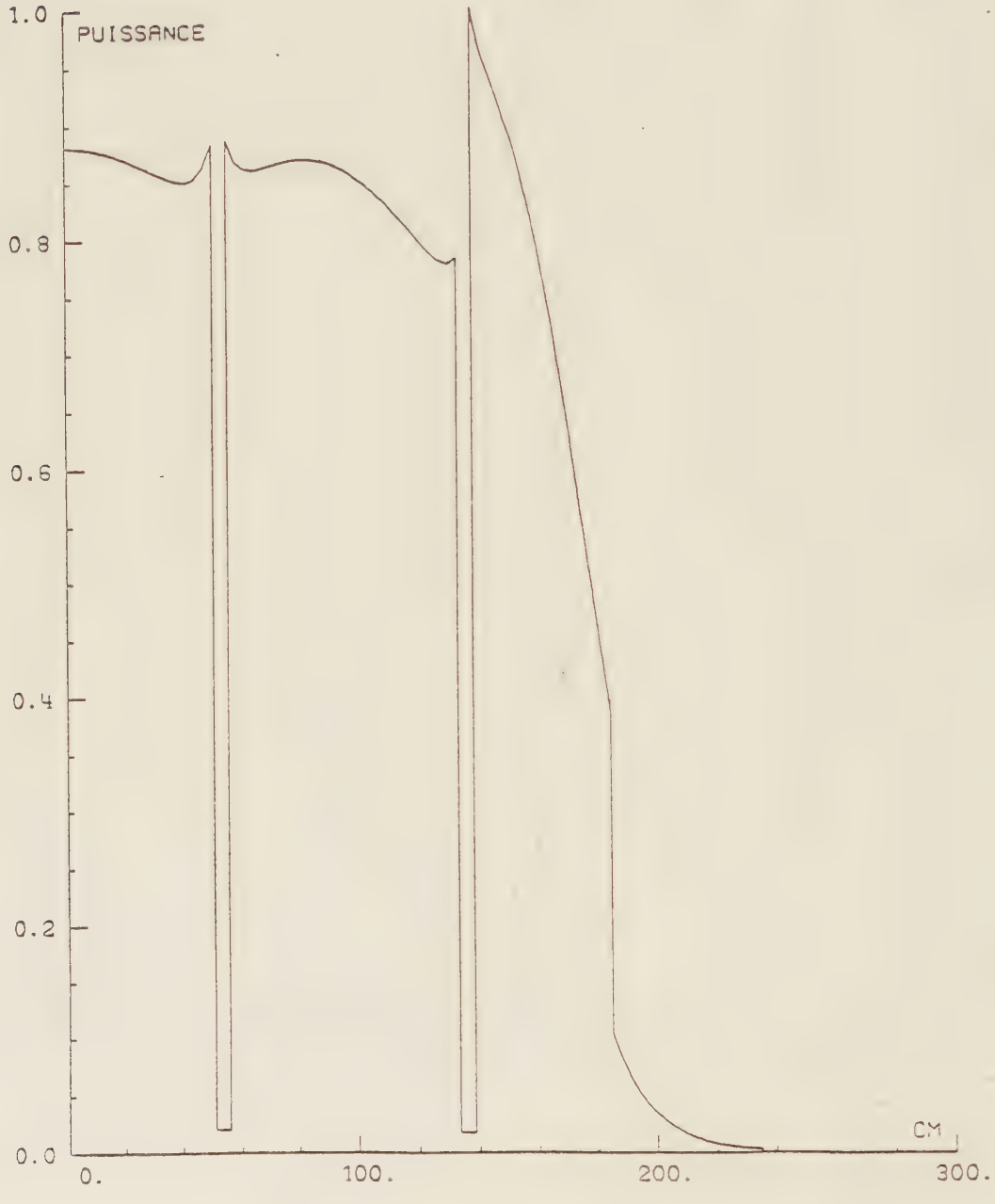


FIGURE N° A.8

MOUVEMENT DE BARRES t = 0

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{XC1}{XC2}$ = 0.77

PUISSANCE MAX = 3.29028E+02

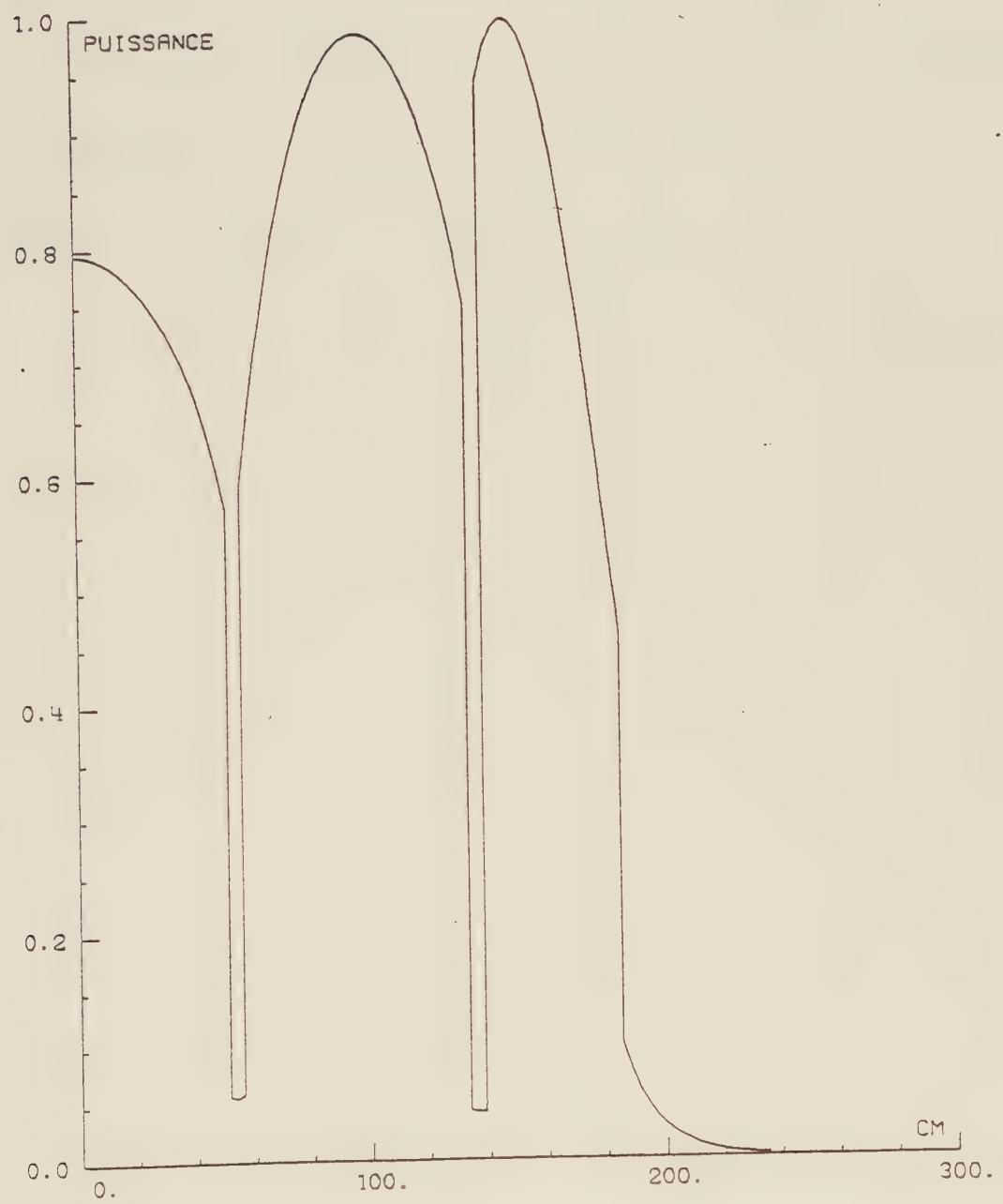
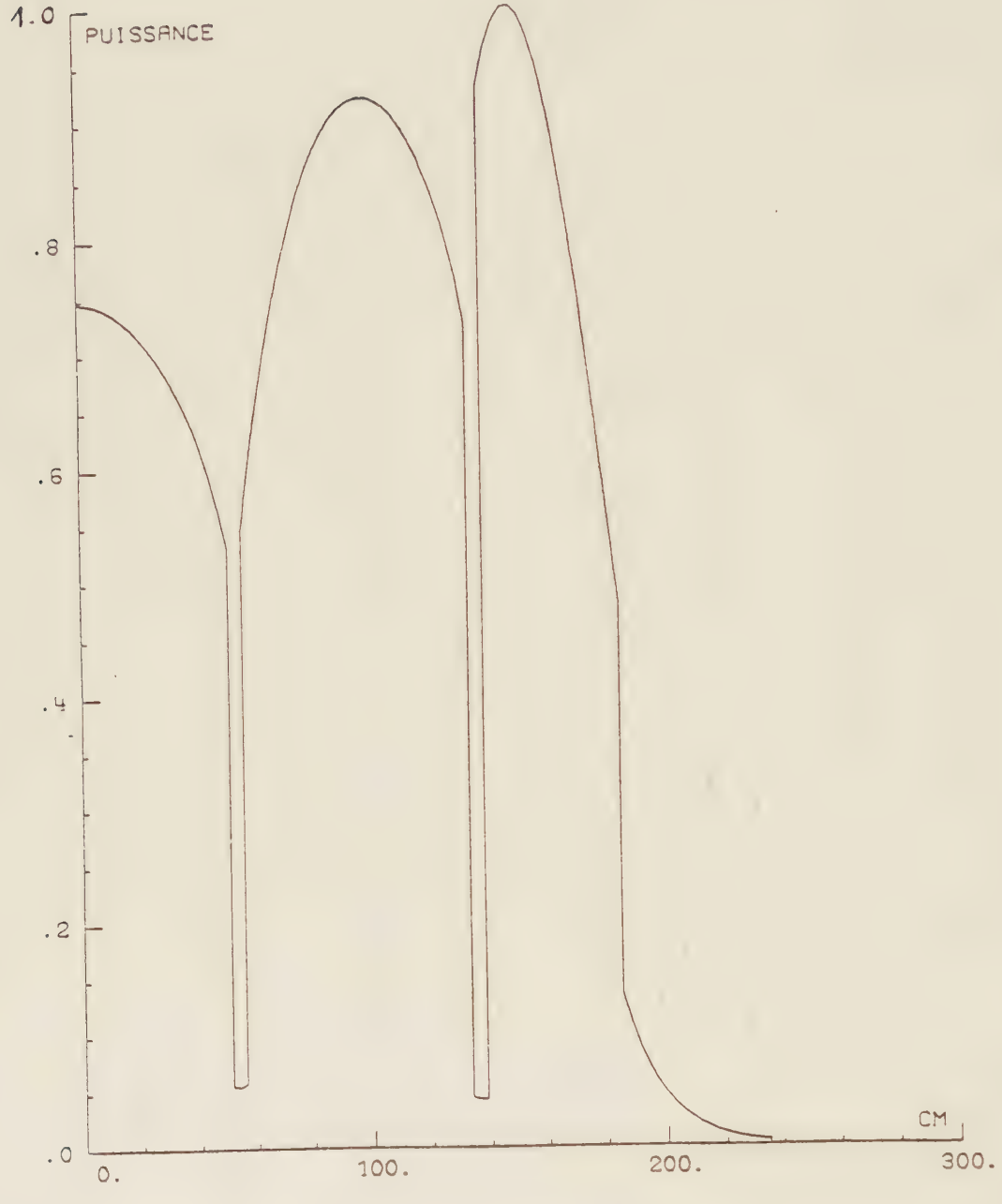


FIGURE N° A.9

MOUVEMENT DE BARRES t = FC
TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{XC1}{XC2}$ = 0.77

PUISSANCE MAX = 3.34740E+02



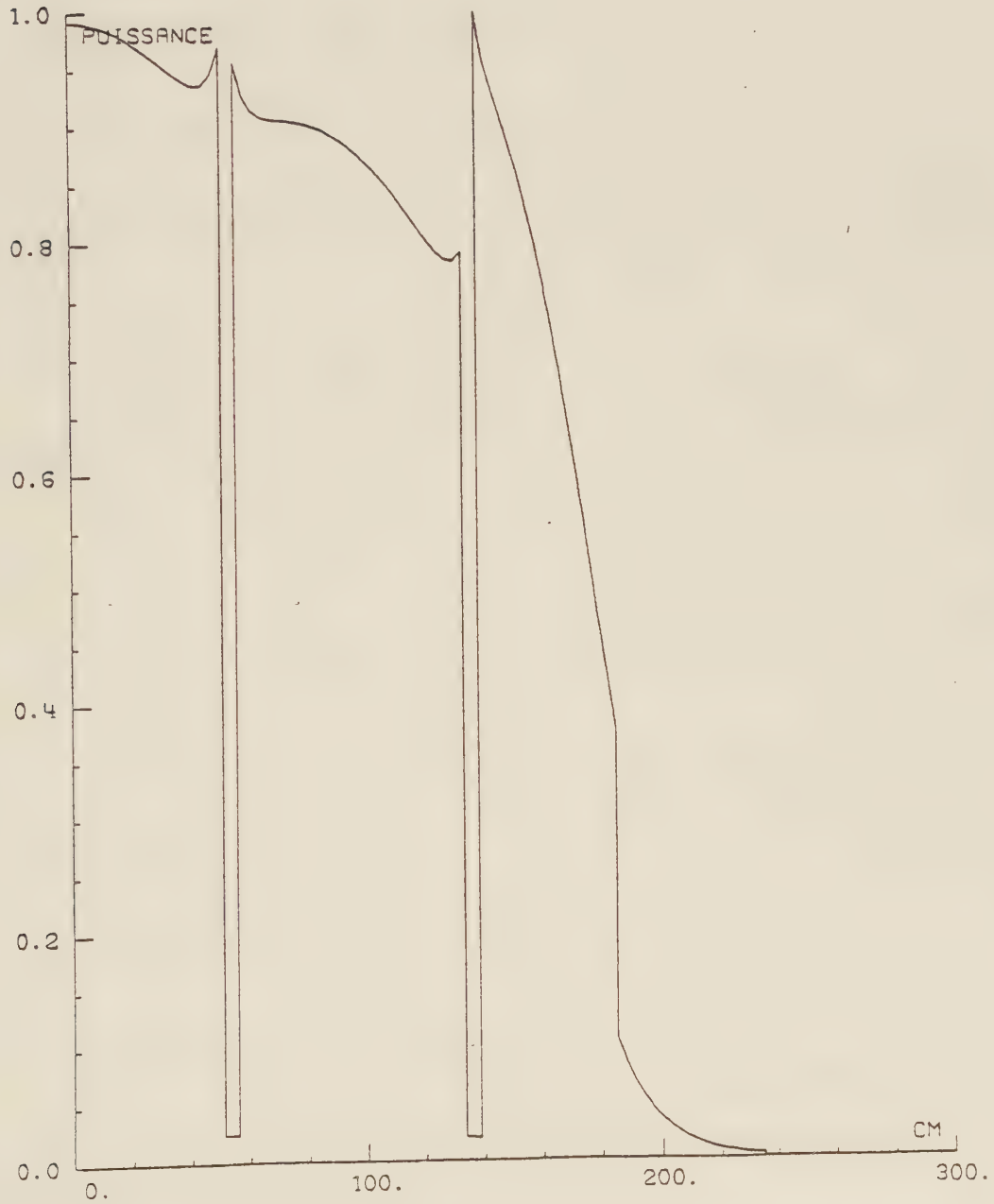

156 BYTE

FIGURE N° A.10

BARRES REMONTEES - FIN DE CYCLE

TRAVERSE DE PUISSANCE $\frac{XC1}{XC2}$ = 0.77

PUISSANCE MAX = 3.47934E+02



ANNEXE II.2

I - L'équation de la diffusion à un groupe d'énergie en milieu homogène s'écrit :

$$D \nabla^2 \phi (r) - \Sigma a \phi (r) + S (r) = 0$$

avec D coefficient de diffusion du milieu

Σa absorption du milieu (capture + fission + fuites "axiales")

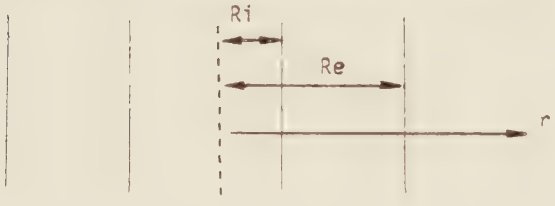
S(r) terme source = $\frac{\nu \Sigma f (r)}{\lambda}$ ($\lambda = 1$ à l'état critique)

En géométrie cyclindrique, l'équation s'écrit :

$$\frac{d^2 \phi (r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \phi (r)}{dr} + B^2 \phi (r) = 0$$

Avec $B^2 = \frac{\nu \Sigma f - \Sigma a}{D}$

Dans le cas d'un coeur nu à deux zones :




Les solutions sont de la forme :

$$\phi_1 = A_1 \ J_o \ (B_1 r) + C_1 \ Y_o \ (B_1 \ r)$$

$$\phi_2 = A_2 \ J_o \ (B_2 r) + C_2 \ Y_o \ (B_2 \ r)$$

Les conditions de :

- dérivée du flux nulle au centre
- flux nul en Re
- continuité du flux à l'interface
- continuité du courant à l'interface

imposent une condition critique

Cette condition s'écrit :

$$\frac{D_1 B_1 J_1 (B_1 Ri)}{D_2 B_2 J_o (B_1 R_i)} = \frac{Y_1 (B_2 Ri) J_o (B_2 Re) - J_1 (B_2 Ri) Y_o (B_2 Re)}{Y_o (B_2 Ri) J_o (B_2 Re) - J_o (B_2 Ri) Y_o (B_2 Re)}$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} \phi_1 (r) = A_1 J_o (B_1 r) \\ \phi_2 (r) = A_2 [\alpha J_o (B_2 r) + \beta Y_o (B_2 r)] \end{cases}$$

$\alpha$ et $\beta$ étant des coefficients déduits des relations précédentes.

II - Si l'on tient compte des coefficients de diffusion, la relation critique ne lie pas, à chaque valeur de $B_1$, une seule valeur de $B_2$. Evaluons l'influence dûe aux coefficients de diffusion D :

II.1 Méthode de référence du calcul de D :

a) Calcul de la section macroscopique en tenant compte des corrections de fuite et de Benoist.

$$\Sigma_g^{tr} = \gamma (F) * \gamma (B) * \sum_i Ni \, \sigma^{tr} (g1 \, i)$$

i = indice de l'isotope
g = indice de groupe

b) Condensation à peu de groupes :

On condense le coefficient de diffusion, ce qui revient à condenser l'inverse de la section de transport.

$$1 / \Sigma^{tr} = \sum_g \varphi_g / \Sigma_g^{tr} \quad \text{et} \quad D = 1 / 3 \, \Sigma^{tr}$$

II.2 Méthode utilisée dans CESAR

Pour les milieux de type combustible, indépendamment des caractéristiques du milieu, à chaque isotope est associé un jeu unique, à 25 groupes, de la section microscopique de transport correspondant au cas moyen

Pourcentage volumétrique combustible Xc = 37,5 %
Enrichissement volumétrique en Pu 02 E = 21 %

A partir des concentrations isotopiques, on calcule les coefficients de diffusion selon la référence, sans faire toutefois les corrections de fuite et de Benoist.

II.3 Approche plus simple du coefficient de diffusion :

a) Calcul des sections microscopiques de transport à 1 groupe en condensant avec le flux cellule du cas moyen. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau (A.1)

b) Calcul de la section macroscopique de transport avec

$$\Sigma^{tr} = \sum_i Ni \times \sigma_i^{tr}$$

et $D = 1 / 3 \times \Sigma^{tr}$

Sur le tableau (A.I) on constate que les sections des isotopes lourds sont très voisines, il en est de même pour l'Acier-Sodium, il est donc possible de représenter la section macroscopique par une formule du type $\Sigma^{tr} = A \times Xc + B$

Les coefficients A et B étant adaptés pour tenir compte de l'erreur de méthode et des spectres légèrement différents si l'on considère un coeur 1 ou un coeur 2.

Finalement on obtient une assez bonne approximation du coefficient de diffusion D à 1 groupe avec les formules suivantes :

$$D_1 = 1 / 3 \times (0.198 \times XC1 + 0.155)$$

$$D_2 = 1 / 3 \times (0.194 \times XC2 + 0.152)$$

La prise en compte des coefficients de diffusion dans la relation critique, est caractérisé par la figure N° A.11

Pour les cas optimisés en aplatissement, les rapports $\phi$ (int)/$\phi$(o) sont généralement supérieurs à 0.7, on voit sur la figure, que pour cette gamme de valeurs l'influence des coefficients de diffusion est tout à fait négligeable.

III -Influence sur les rapports $\Sigma_1^P / \Sigma_2^P$

La section macroscopique de puissance $\Sigma^P$ peut s'exprimer à partir des concentrations d'uranium 238 ($N_8$) et de Plutonium 239 ($N_9$) par :

$$\Sigma^P = AN_8 + CN_9 \quad \text{avec} \quad A = 10 \text{ Mev. barns}$$
$$C = 500 \text{ Mev. barns}$$

De même les fuites :

$$DB^2 = EN_8 + FN_9 \quad \text{avec} \quad E = -0.2 \text{ barns}$$
$$F = +4.0 \text{ barns}$$

La comparaison des cas :

ⓐ Combustible coeur1 et coeur 2 uniquement constitué du Pu9.

et ⓑ Pu9 + U8 dans coeur 1
Pu9 seul dans coeur 2

donne en tenant compte des coefficients de diffusion :

$$ⓐ \quad \frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \frac{D_1}{D_2}\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 \simeq \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2$$

$$ⓑ \quad \frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = 0.85\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 + 0.07\,\frac{N_1^8}{N_2^9}$$

Le rapport $\frac{N_1^8}{N_2^9}$ est voison de 10.

Le cas extrême XC1 = 45 %
XC2 = 30 %

fournit la valeur $\frac{D1}{D2} = 0.85$

d'où

$$\frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 + 0.7 - 0.15\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2$$

Dans la gamme qui nous intéresse $\frac{B1}{B2}$ est toujours inférieur à 1 donc

$$\frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} = \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 + \alpha' \qquad \text{avec } \alpha' > 0 \Longrightarrow \frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} > \frac{\Sigma_1^P}{\Sigma_2^P} \quad (a)$$

En conclusion l'influence des coefficients de diffusion est totalement négligeable.

TABLEAU A.1

Sections efficaces microscopiques de transport à 1 groupe en barns.

Isotopes lourds

| | | | |
|---|---|---|---|
| U235 | 7.9 | Pu 239 | 8.4 |
| U238 | 8.2 | Pu 240 | 8.1 |
| | | Pu 241 | 8.0 |
| | | Pu 242 | 7.6 |

Isotopes légers

| | | | |
|---|---|---|---|
| Fe | 2.6 | Na | 3.4 |
| Cr | 3.1 | O | 3.0 |
| Ni | 5.0 | | |
| Si | 1.8 | | |
| Mn | 4.5 | | |

Prise en compte des coefficients de diffusion dans l'expression de Jo ($B_1$Ri) en fonction de $B_1/B_2$

① concept compositions variables
② concept enrichissements variables
③ concept hybride.

Figure n° A.11

# Bibliographie

## BIBLIOGRAPHIE

/1/ Les réacteurs à Neutrons Rapides - Dossier Surrégénérateur
Brochures EDF.

/2/ Communication personnelle.
J. RECOLIN

/3/ Calcul de l'autoprotection résonnante dans les cellules complexes par la méthode des sous-groupes. IAEA/SM - 154/37 - Vienne 1973.
A. KHAIRALLAH - J. RECOLIN

/4/ Communication personnelle.
MOUGIN

/5/ Communication personnelle
MOUGIN

/6/ Communication personnelle.
C. GIACOMETTI

/7/ Différences finies - Numerical Methods for Scientists and Engineers.
R.W HAMMING - 1962

/8/ The Mathematics of Diffusion
J. CRANK - 75

/9/ Communication personnelle.
P. SALVATORES

/10/ Traité de Neutronique.
P. BUSSAC - P. REUSS

/11/ Communication personnelle.
J.Y PIPAUD

/12/ Communication personnelle.
J.C CABRILLAT

/13/ Etude d'un coeur homogène à compositions variables.
J. VERGNES - Note EDF.

/14/ Communication personnelle.
J.C CABRILLAT

/15/ 23rd Annual Meeting - American Nuclear Society.
Preliminary Physics Study of a large Fast core based on the heterogenous core concept.
B. SICARD and al.

/16/ Communication personnelle.
J.C CABRILLAT

# Figures

U 238 GROUPE 5 Xc = 37,5 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction de l'enrichissement

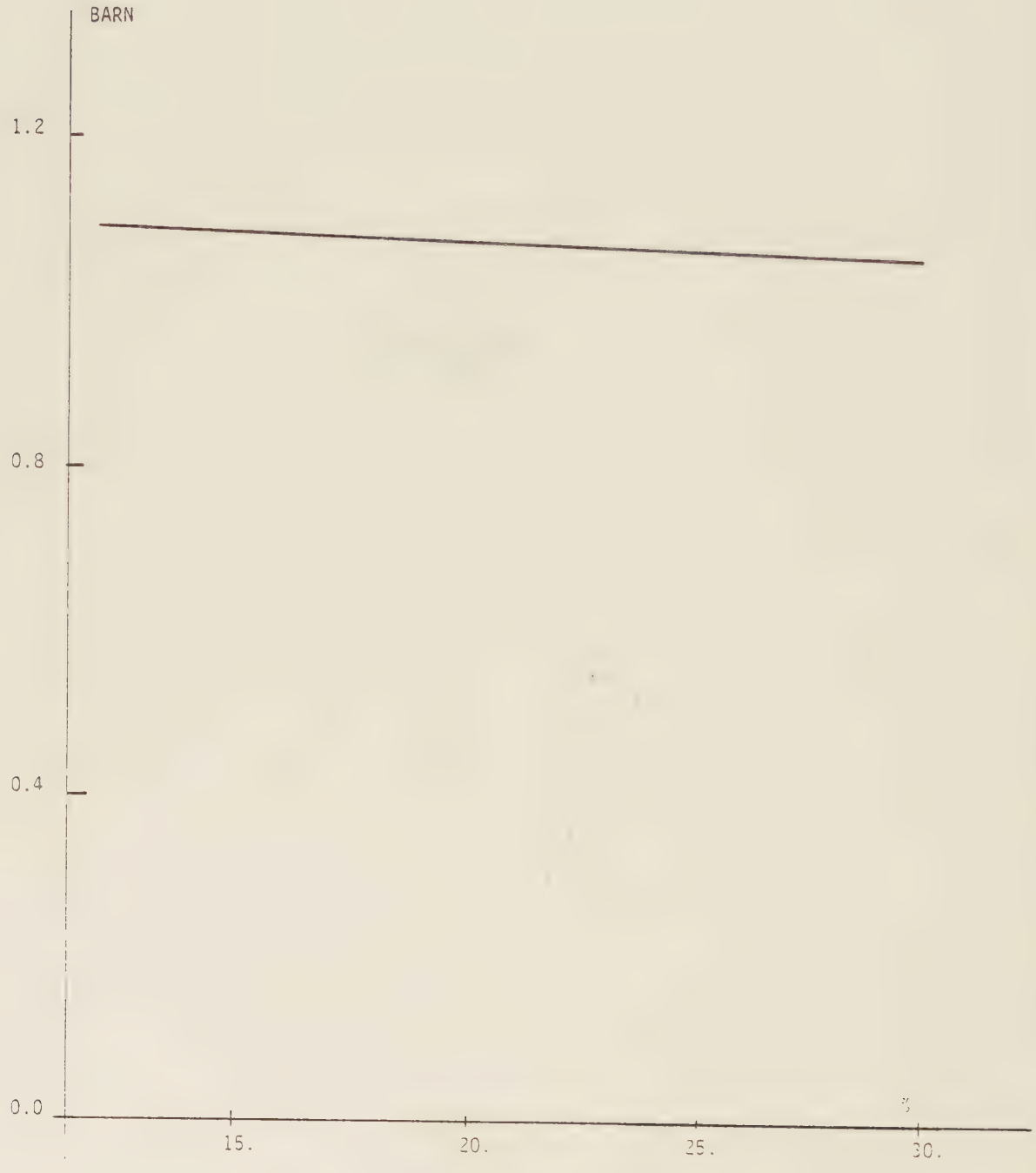



FIGURE N° 1

U 238 GROUPE 6 Xc = 37,5 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction de l'enrichissement

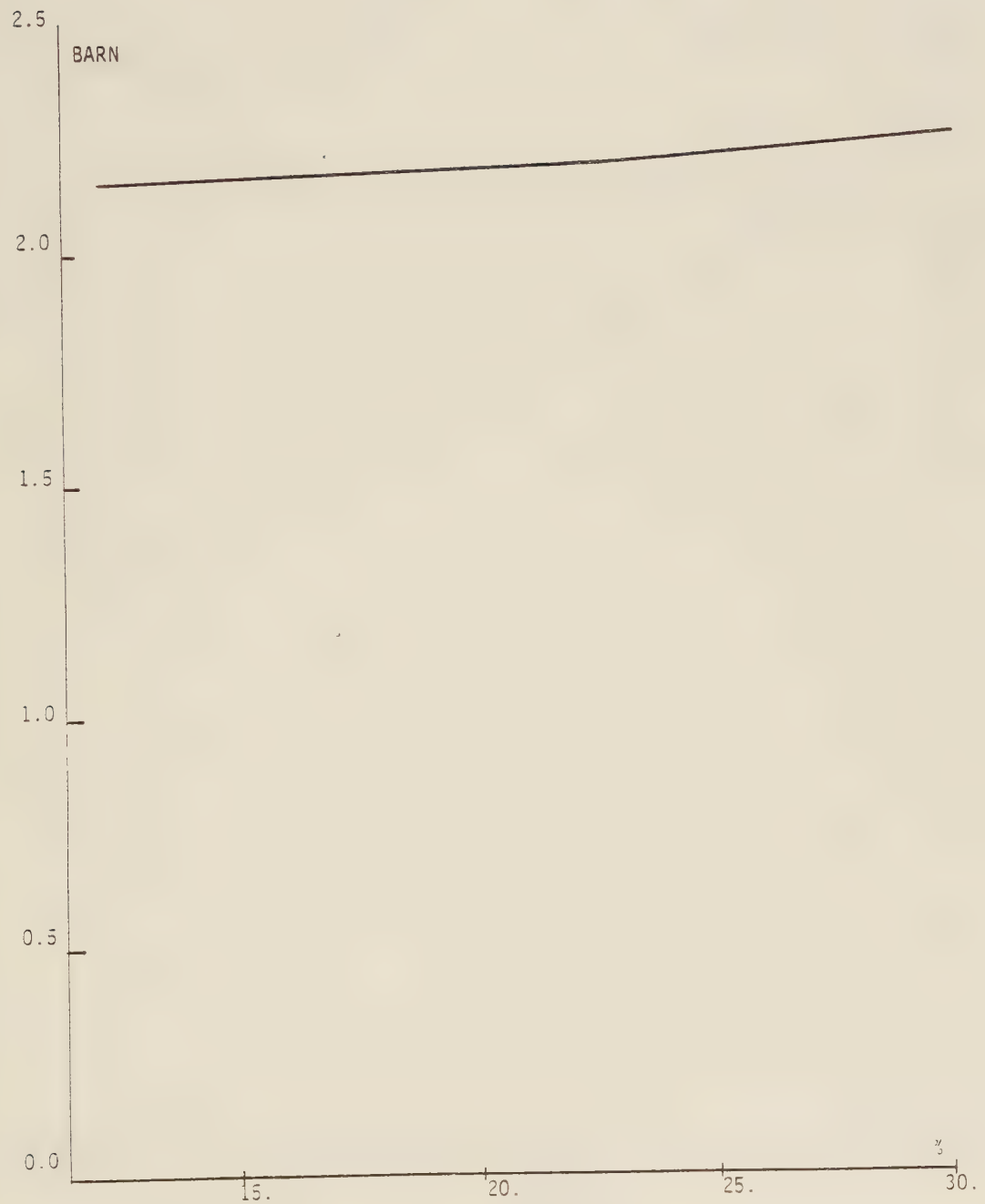



FIGURE N° 2
==========

Pu 239 GROUPE 6 Xc = 37,5 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction de l'enrichissement

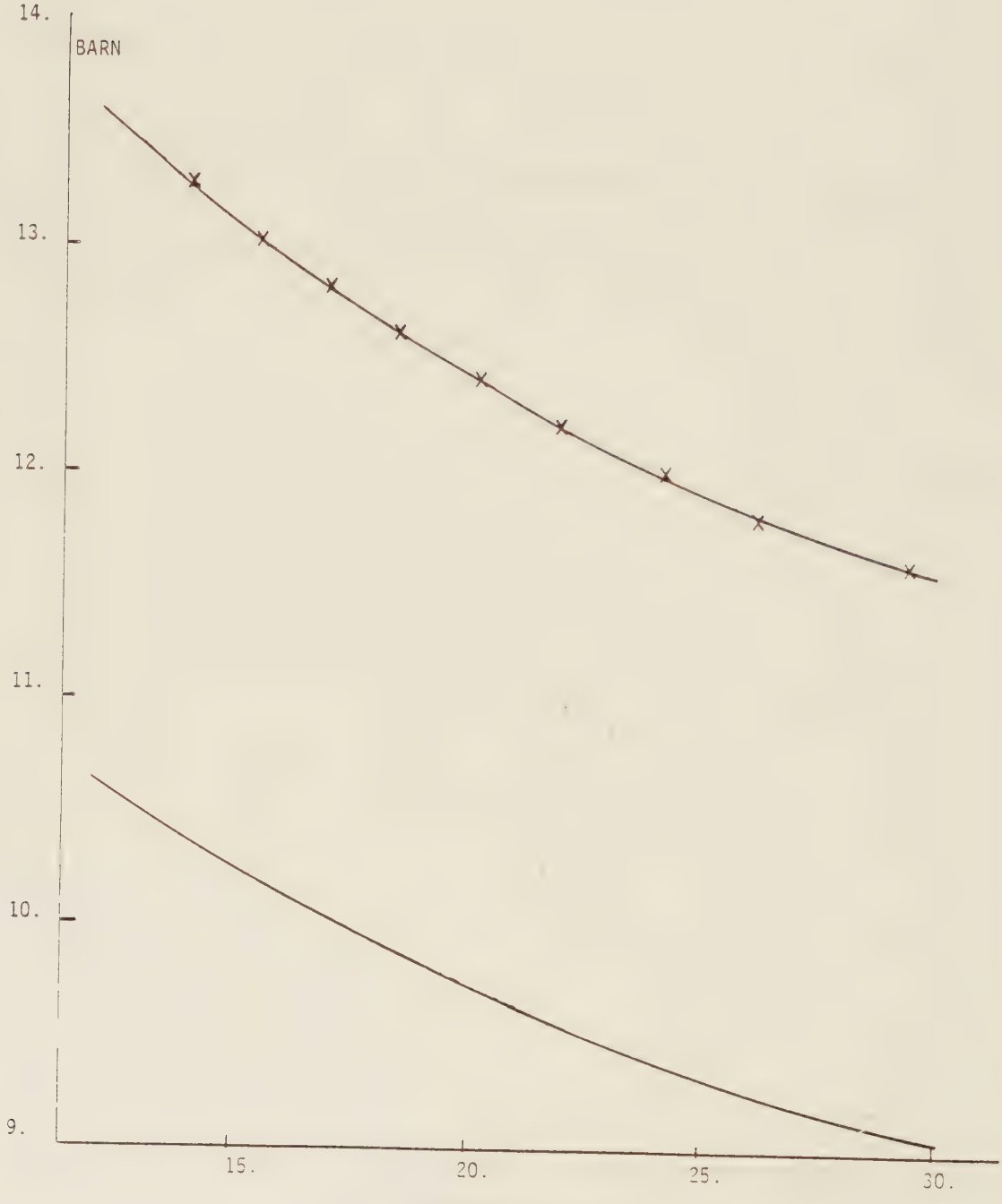



FIGURE N° 3
==========

Pu 239 GROUPE 5 Xc = 37,5 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction de l'enrichissement

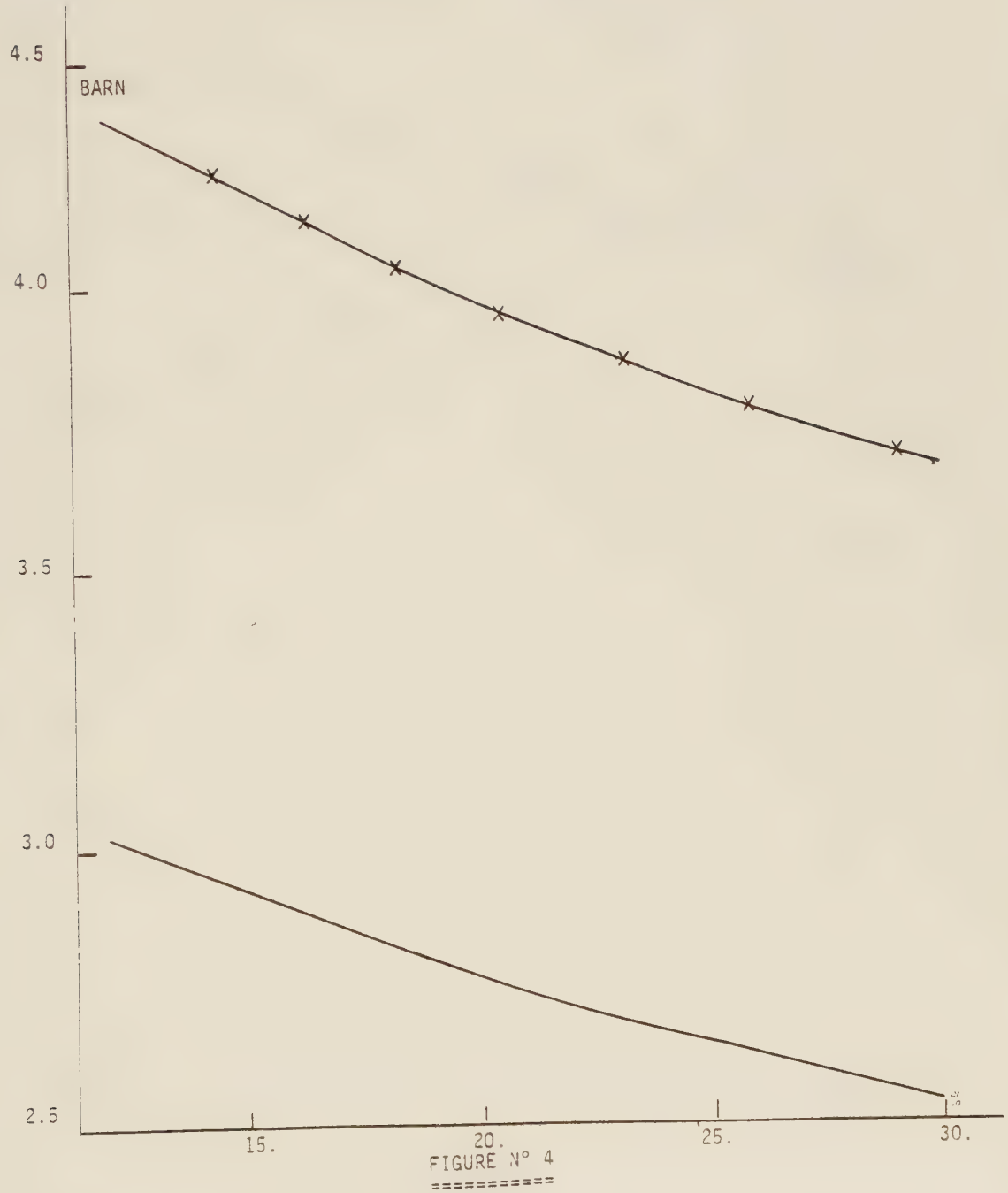



FIGURE N° 4
==========

Pu 239 GROUPE 5 E = 21 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction du pourcentage combustible

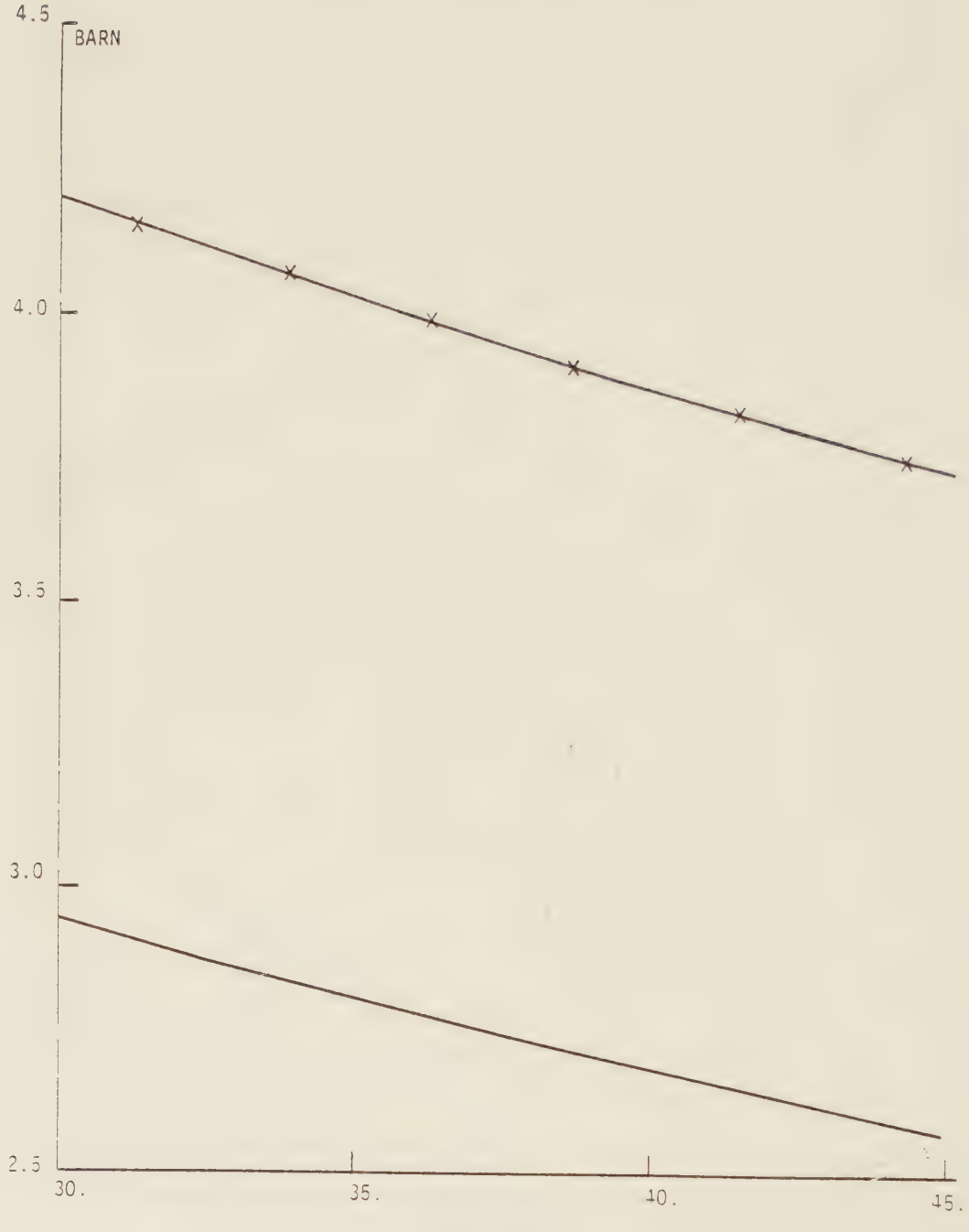



FIGURE N° 5
==========

Pu 239 GROUPE 6  E = 21 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

En fonction du pourcentage combustible

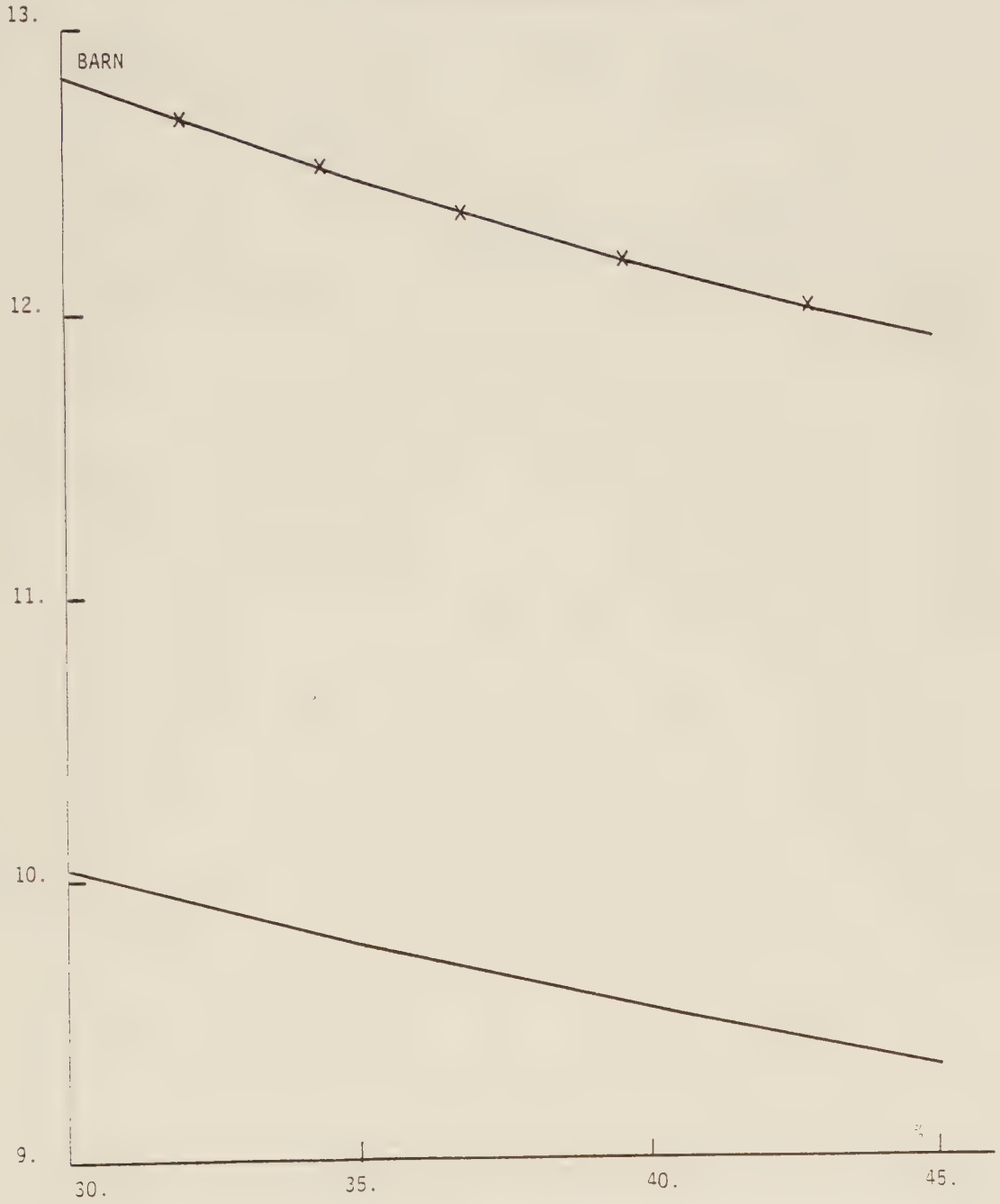



FIGURE N° 6

U238 GROUPE 5 E = 21 %

SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)

en fonction du pourcentage combustible

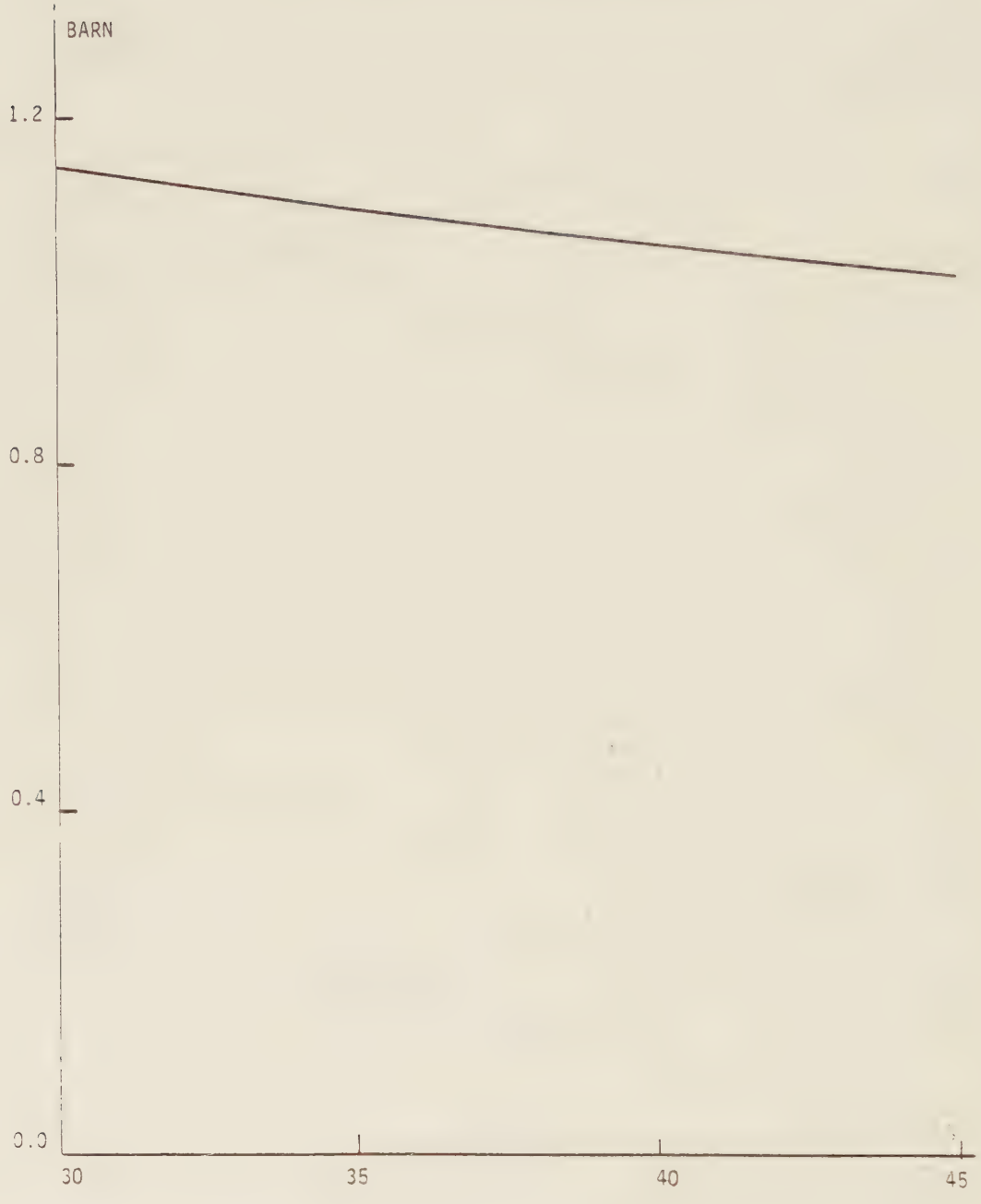



FIGURE N° 7
==========

U 238 GROUPE 6  E = 21 %
SECTION DE CAPTURE ET DE FISSION (X)
en fonction du pourcentage combustible

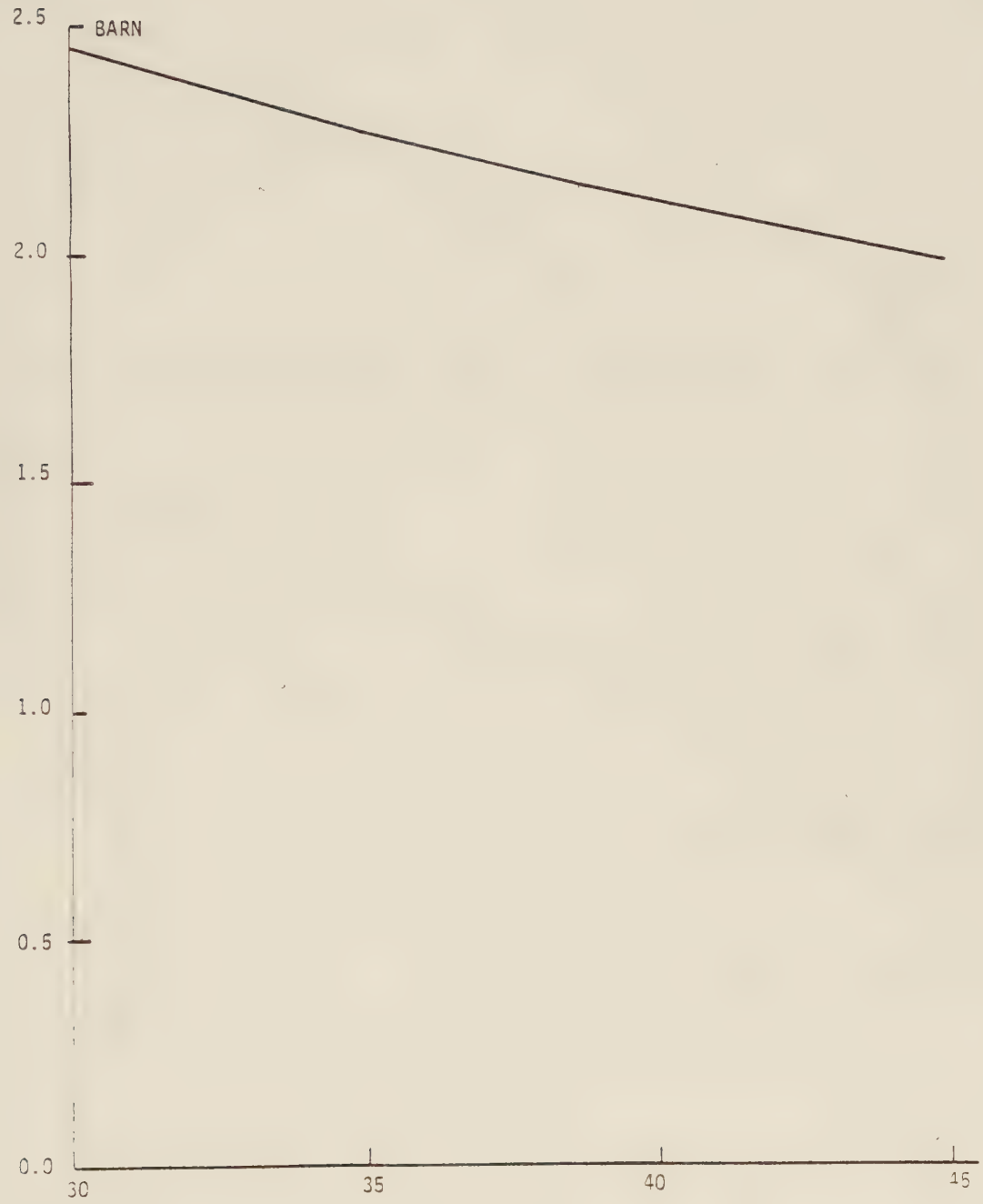



FIGURE N° 8
==========

EFFET EN REACTIVITE D'UNE VARIATION DU RAPPORT POURCENTAGE ACIER SUR POURCENTAGE SODIUM (R)

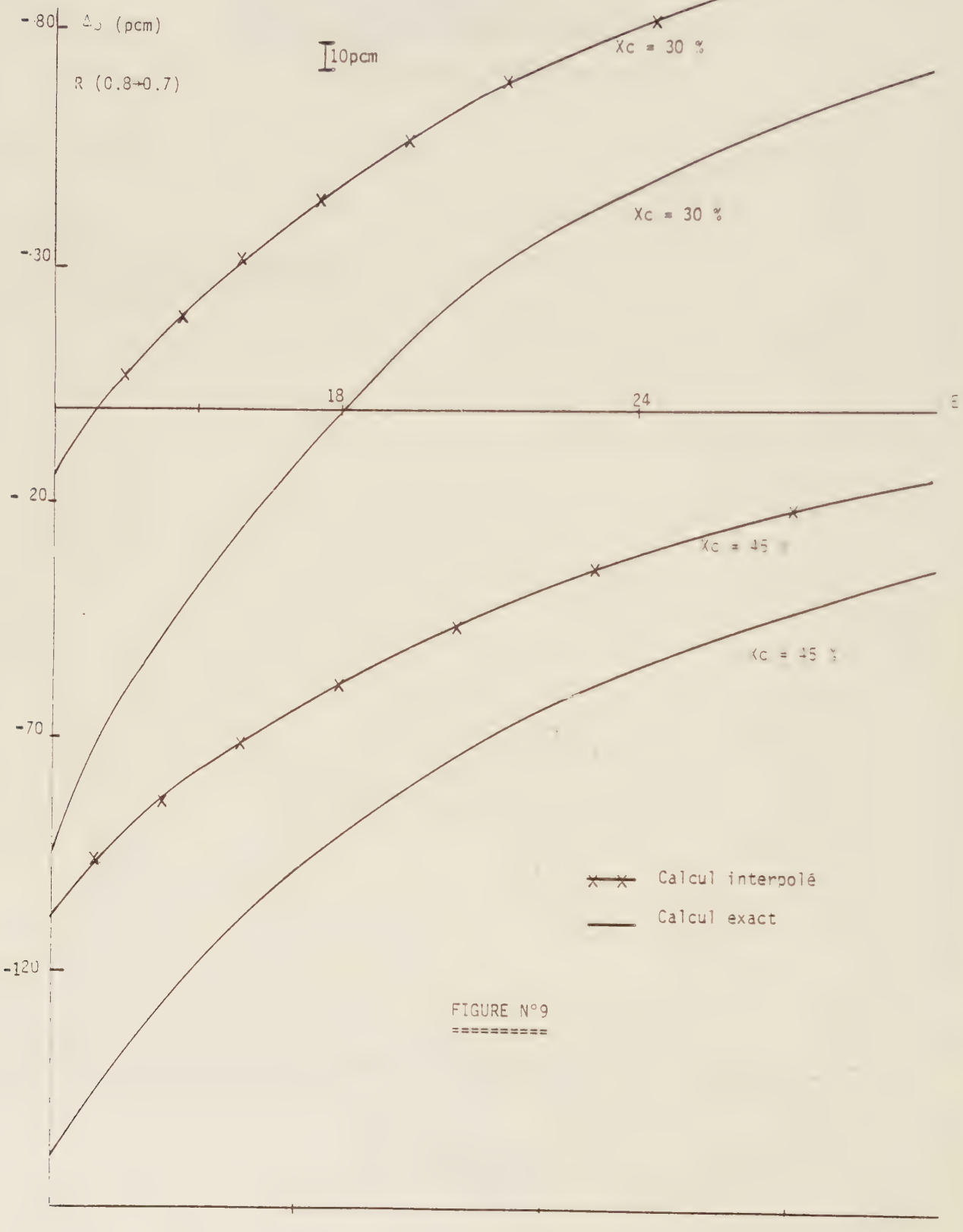



FIGURE N°9
==========

Concept Homogene Enrichissements variables

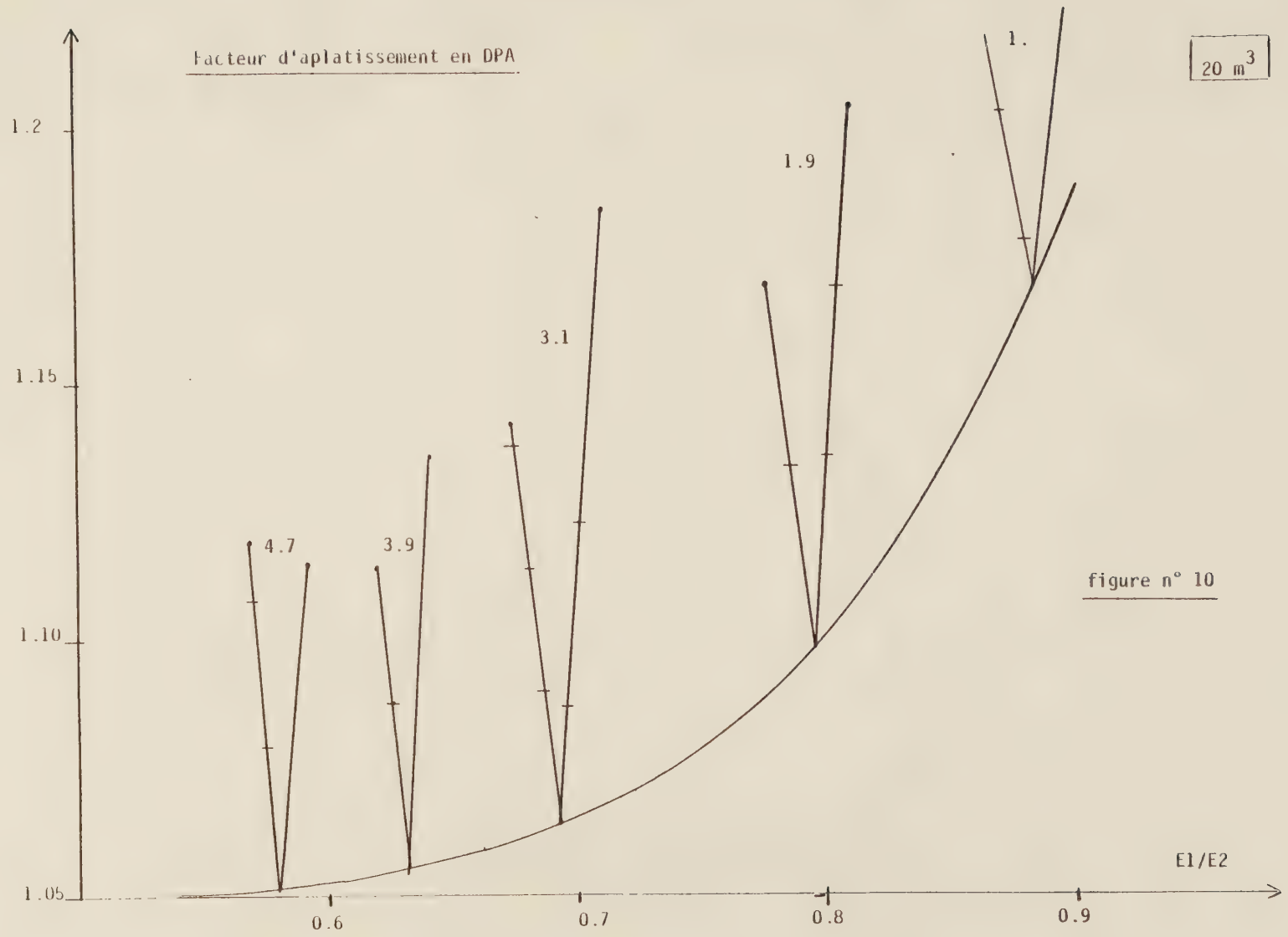



figure n° 10

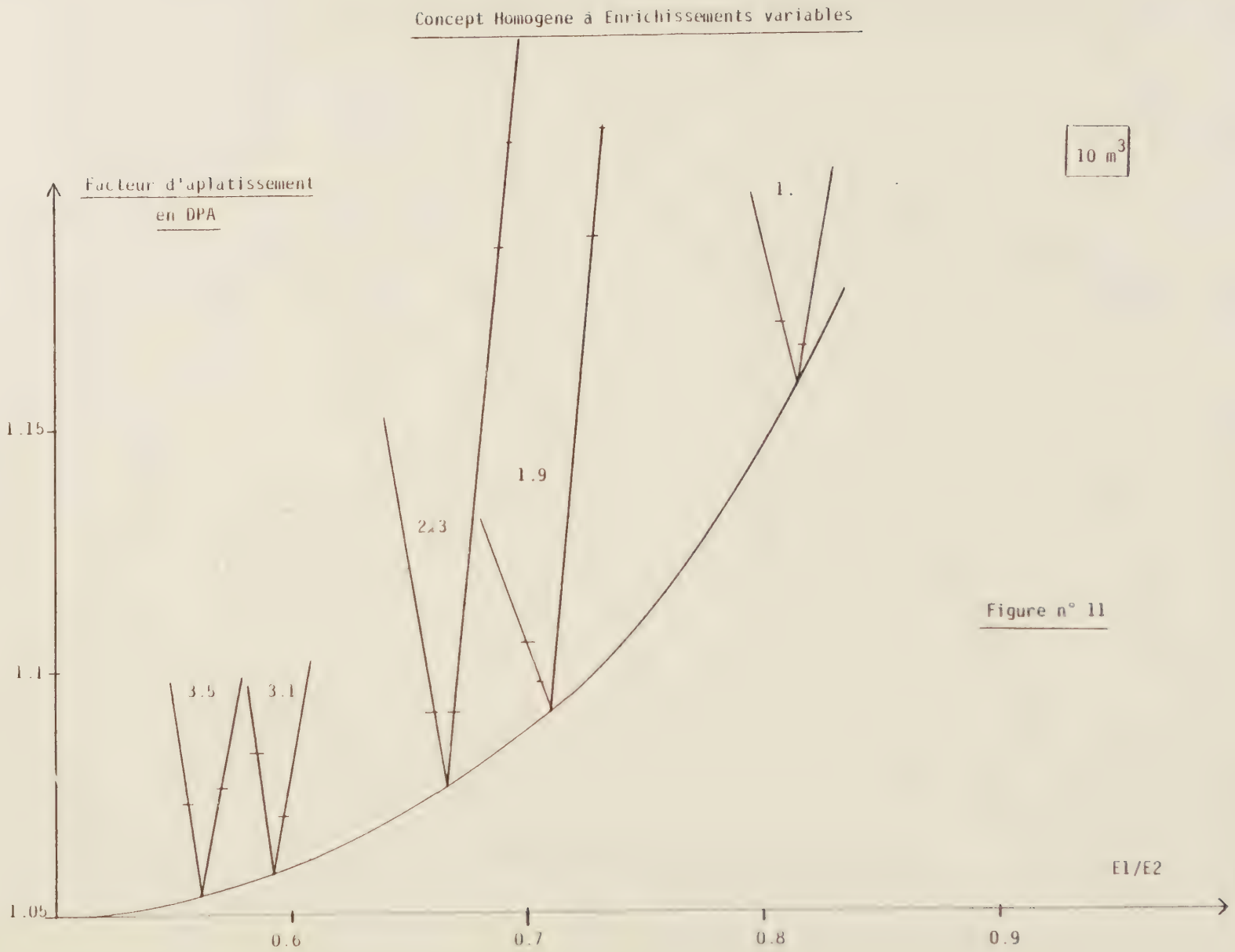

Concept Homogene à Enrichissements variables
10 m3
Facteur d'aplatissement
en DPA
1.15
1.1
1.05
3.5
3.1
2.3
1.9
1.
0.6
0.7
0.8
0.9
E1/E2

Figure n° 11

Concept homogène enrichissements variables

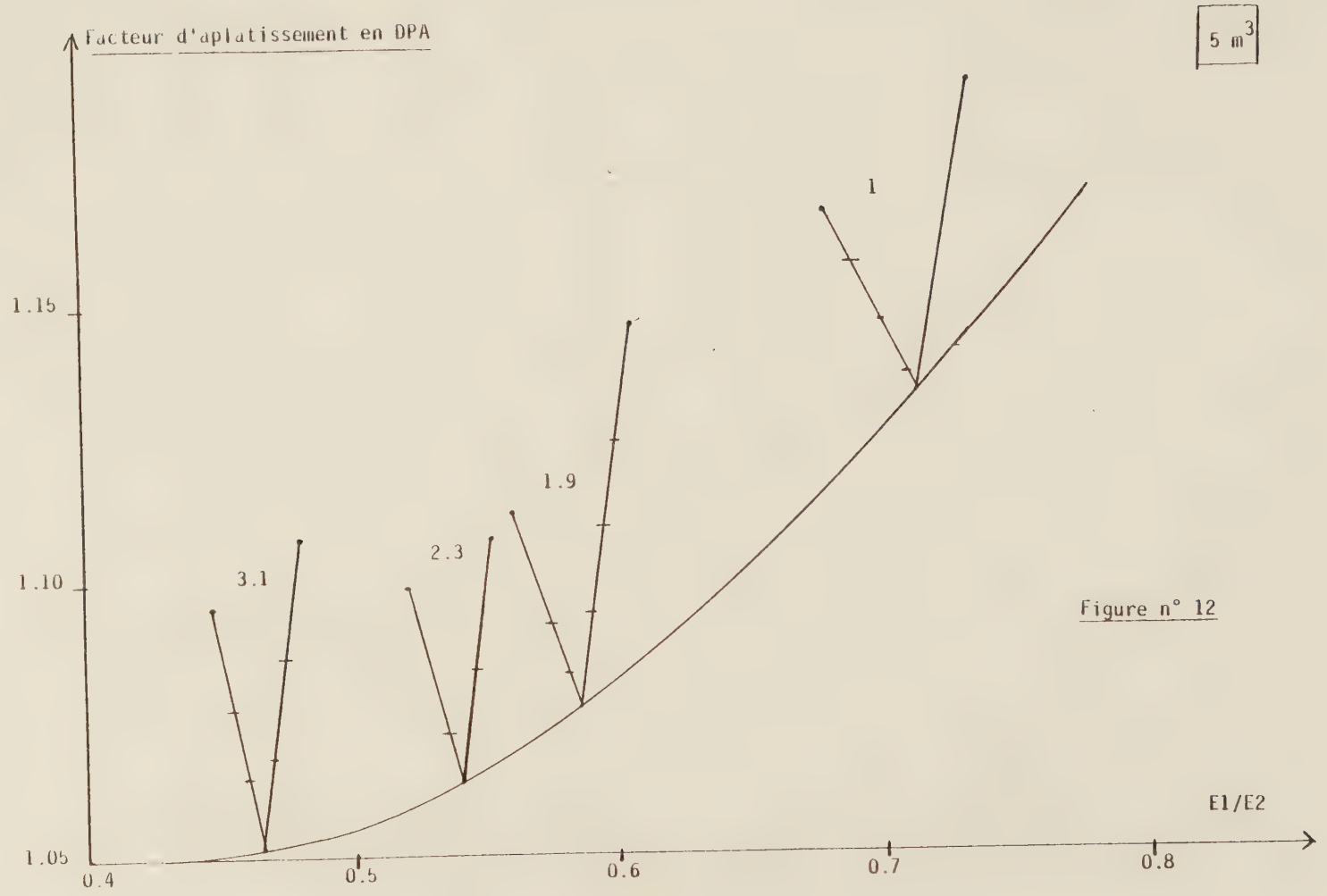



Figure n° 12

Concept homogene à compositions variables

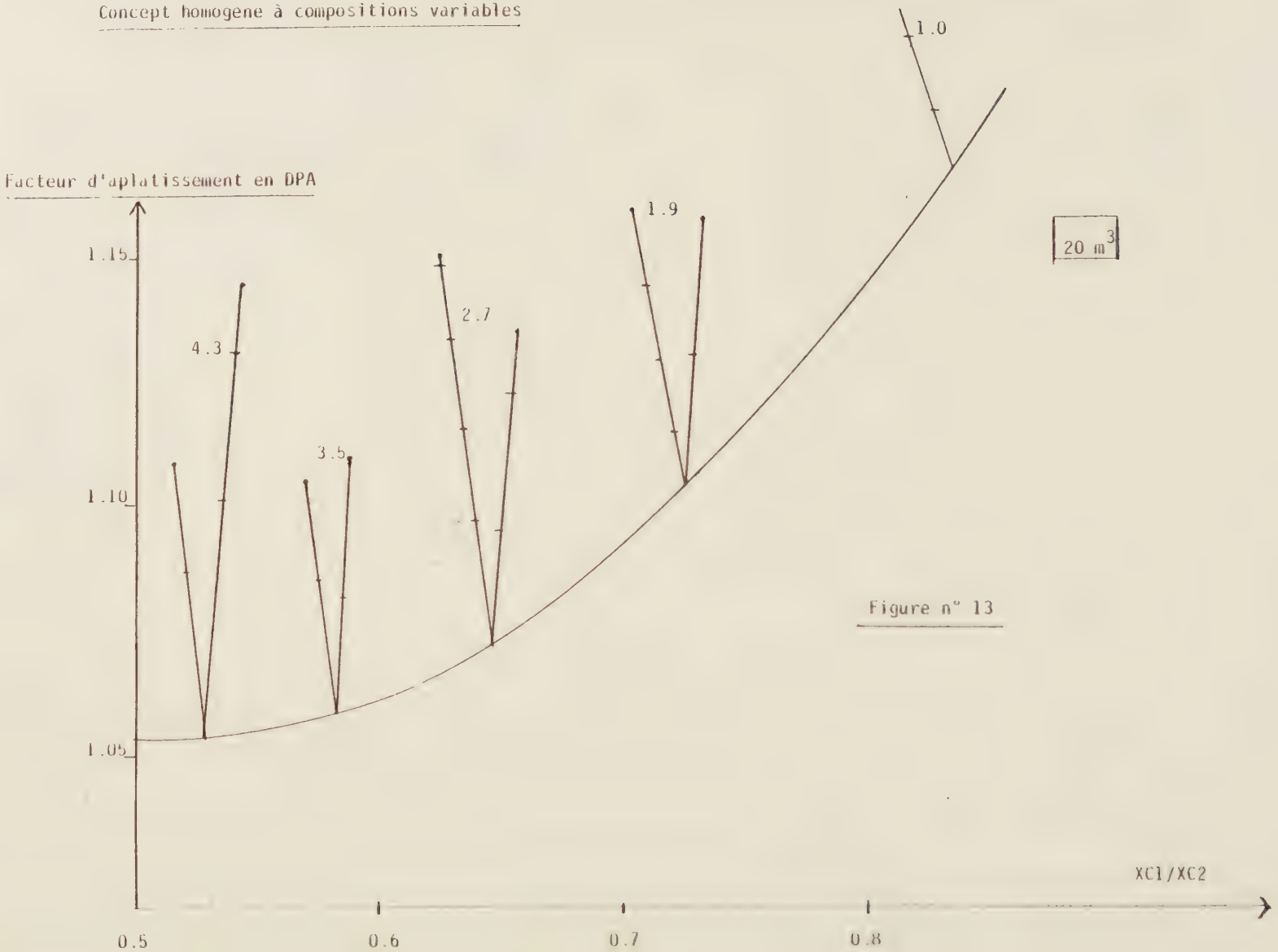



Figure n° 13

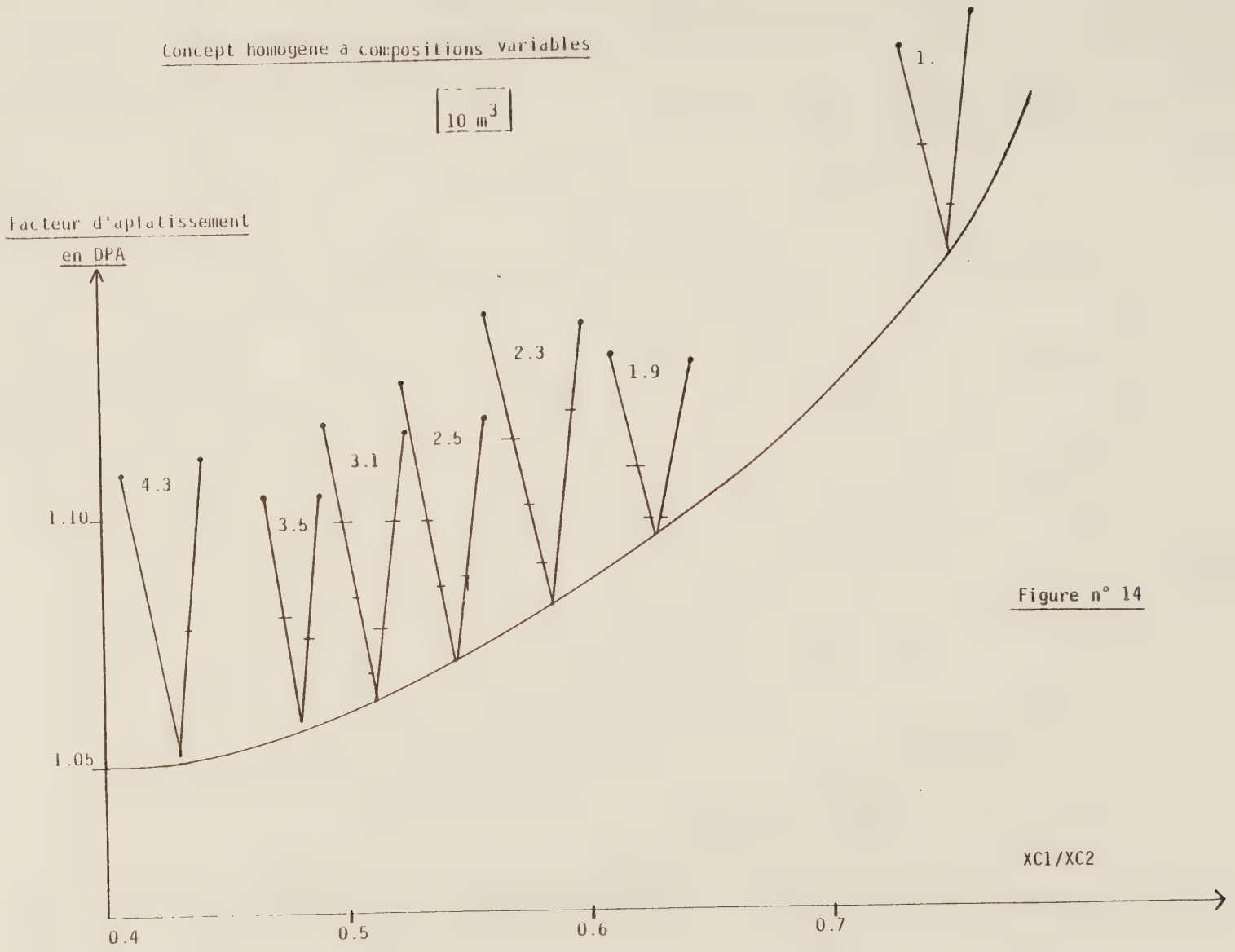

Concept homogene à compositions variables
10 m3
Facteur d'aplatissement
en DPA
1.10
1.05
4.3
3.5
3.1
2.5
2.3
1.9
1.
XC1/XC2
0.4
0.5
0.6
0.7

Figure n° 14

Concept homogene compositions variables

5 m$^3$

Facteur d'aplatissement en DPA

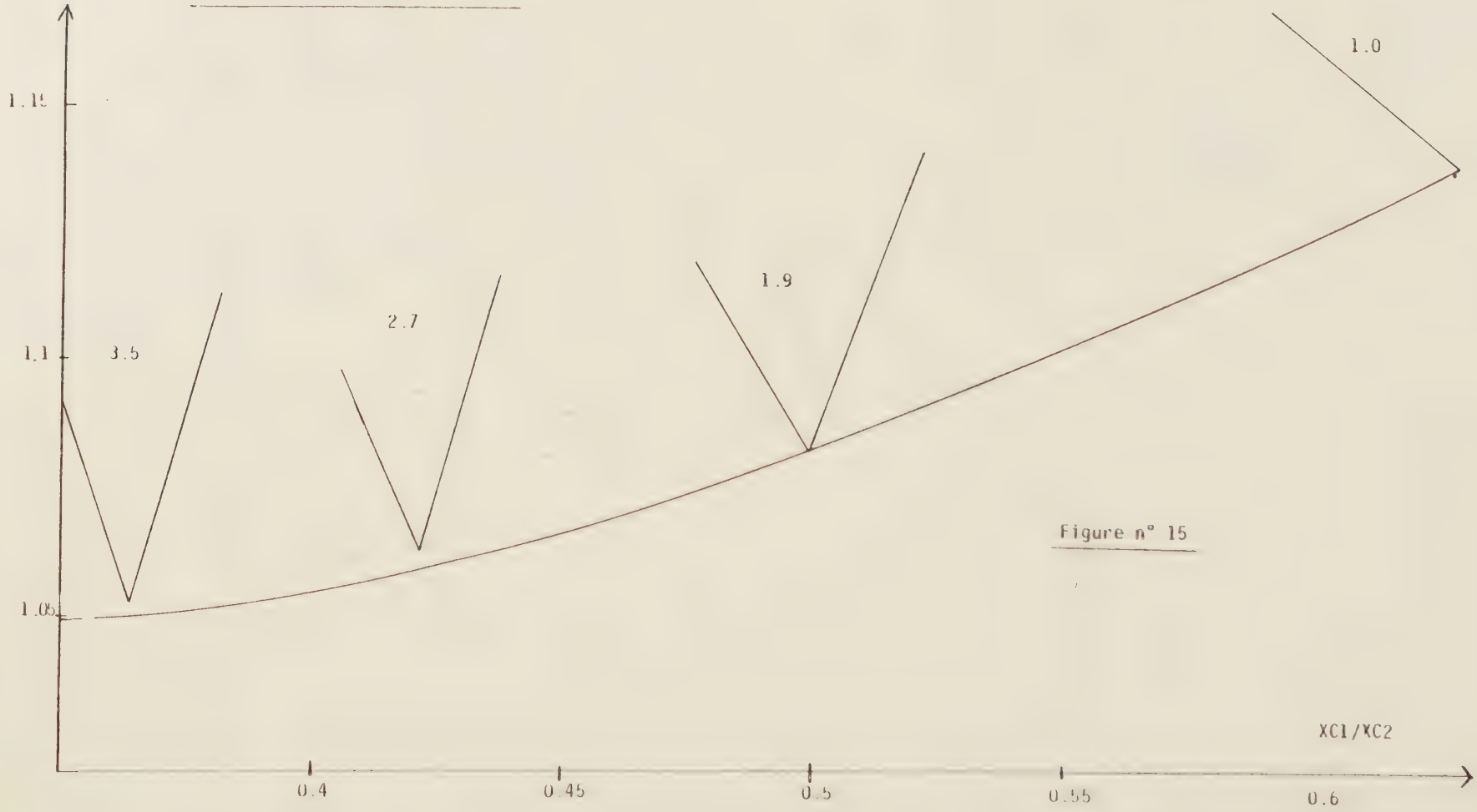



Figure n° 15

Enveloppes des minimums de $\gamma$ pour différentes valeurs de $\alpha = \frac{V_1}{V_2}$

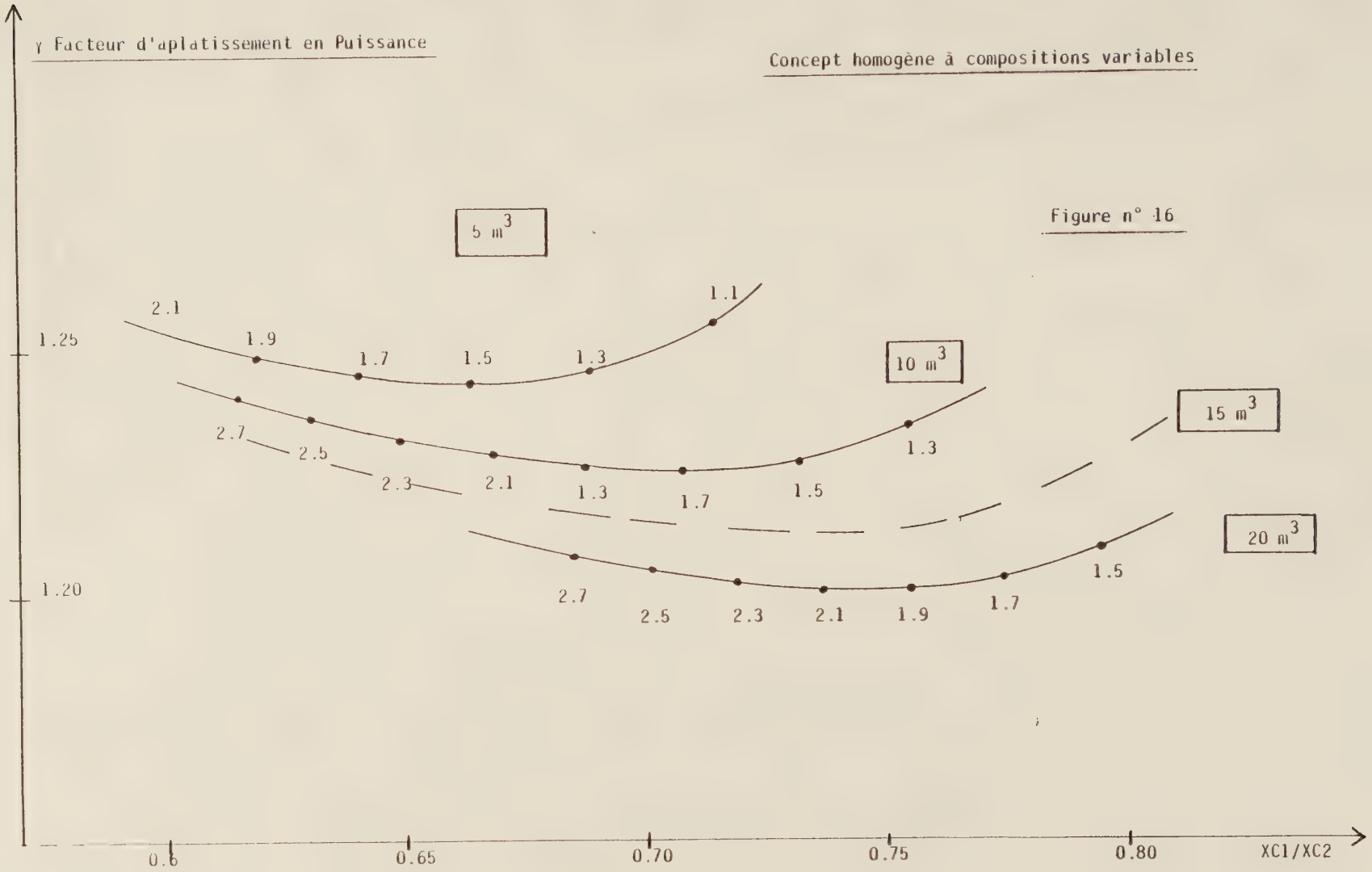
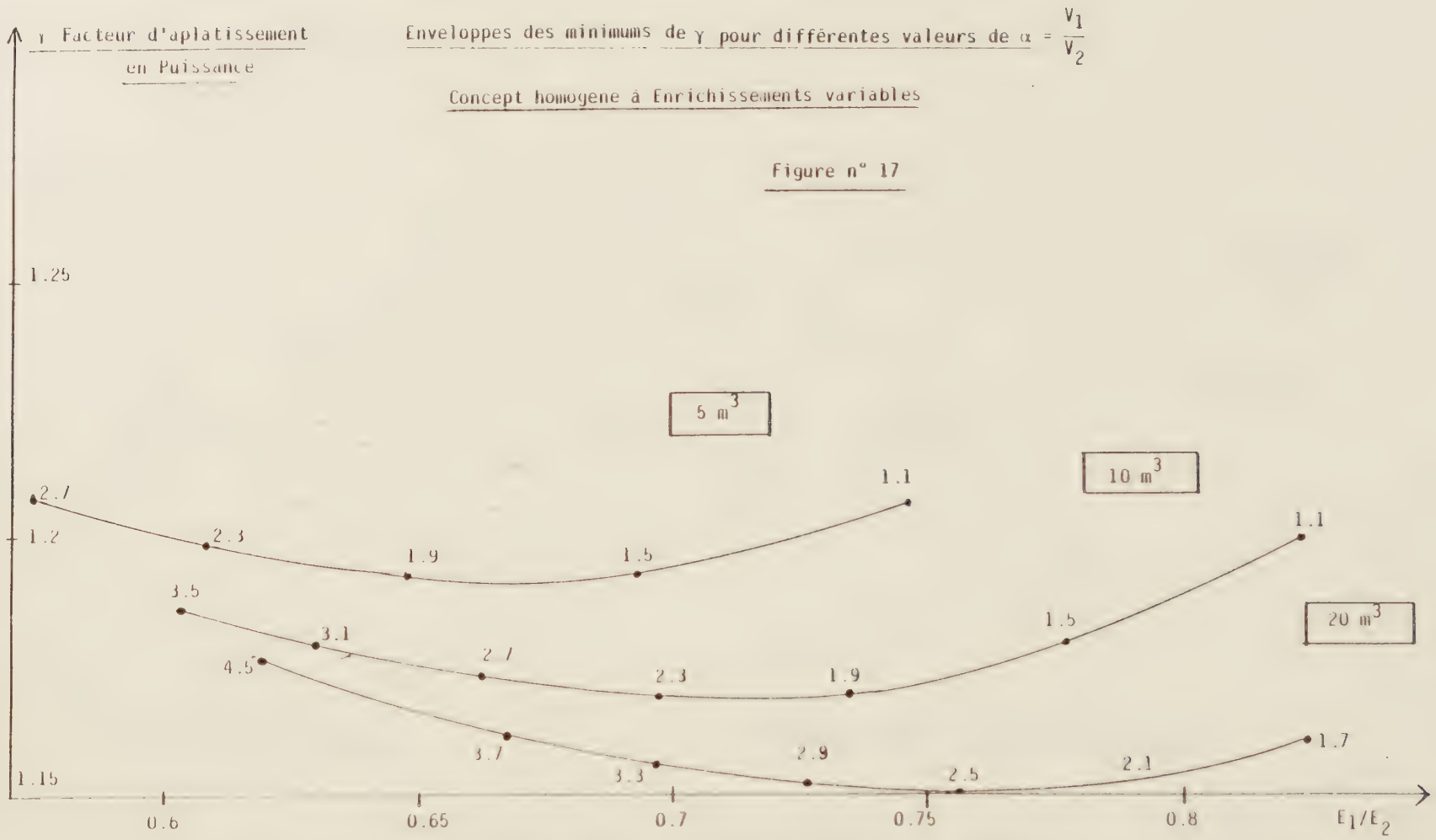



Figure n° 16


γ Facteur d'aplatissement en Puissance
Enveloppes des minimums de γ pour différentes valeurs de α = V1/V2
Concept homogene à Enrichissements variables
Figure n° 17
1.25
1.2
1.15
5 m3
10 m3
20 m3
2.7
2.3
1.9
1.5
1.1
3.5
3.1
2.7
2.3
1.9
1.5
1.1
4.5
3.7
3.3
2.9
2.5
2.1
1.7
0.6
0.65
0.7
0.75
0.8
E1/E2

- Concept hétérogène -

Enveloppes des minimums du Facteur
d'aplatissement en puissance
1 pavé + 1 couronne

Figure n° 18

- Concept hétérogène -

Enveloppes des minimums du facteur
d'aplatissement de puissance
1 pavé + 2 couronnes

Figure n° 19

Enveloppes des minimums du facteur d'aplatissement en puissance pour différents volumes du pavé

Configuration 1 pavé + 1 couronne
(Volume coeur = 20 $m^3$)

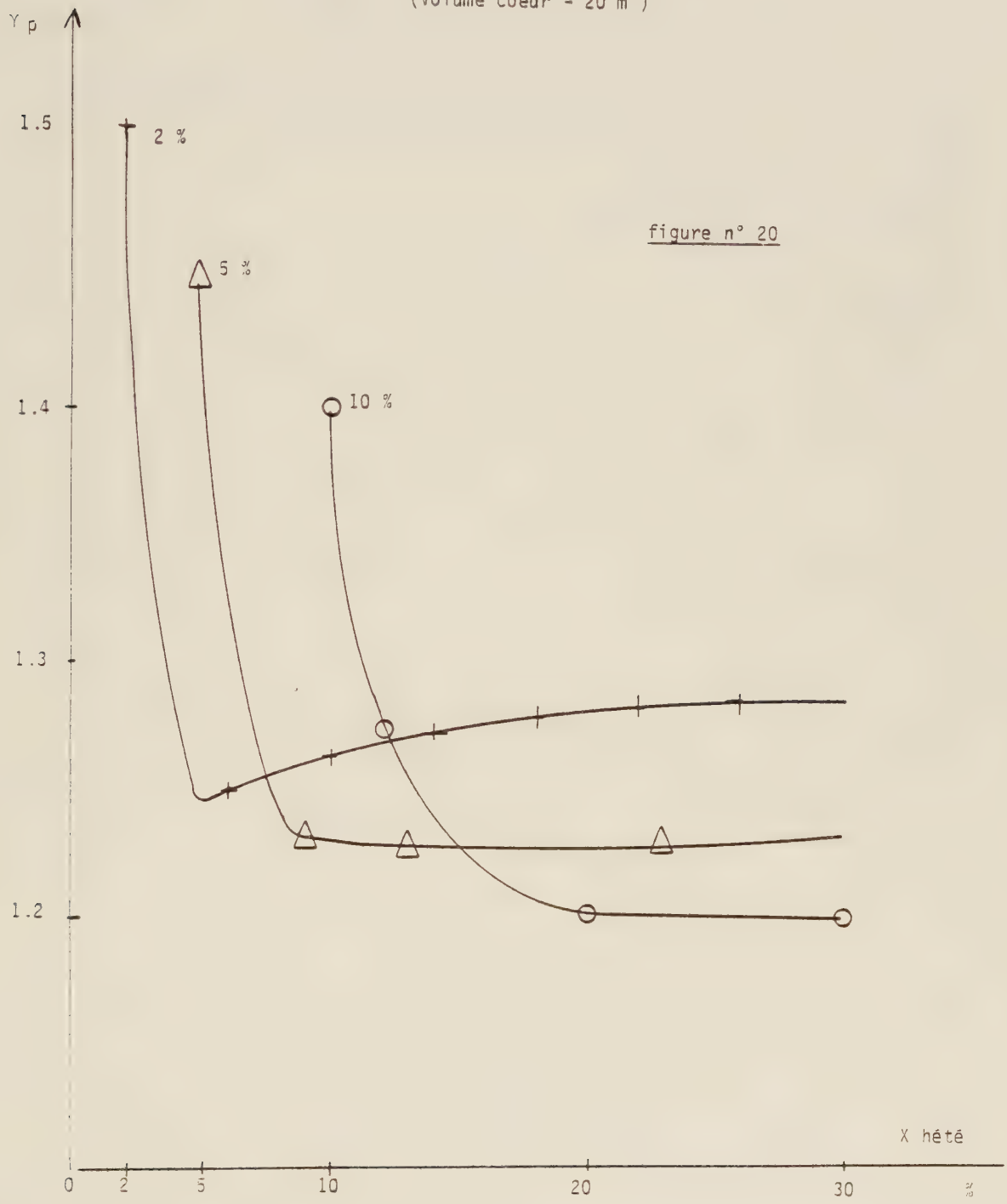



figure n° 20

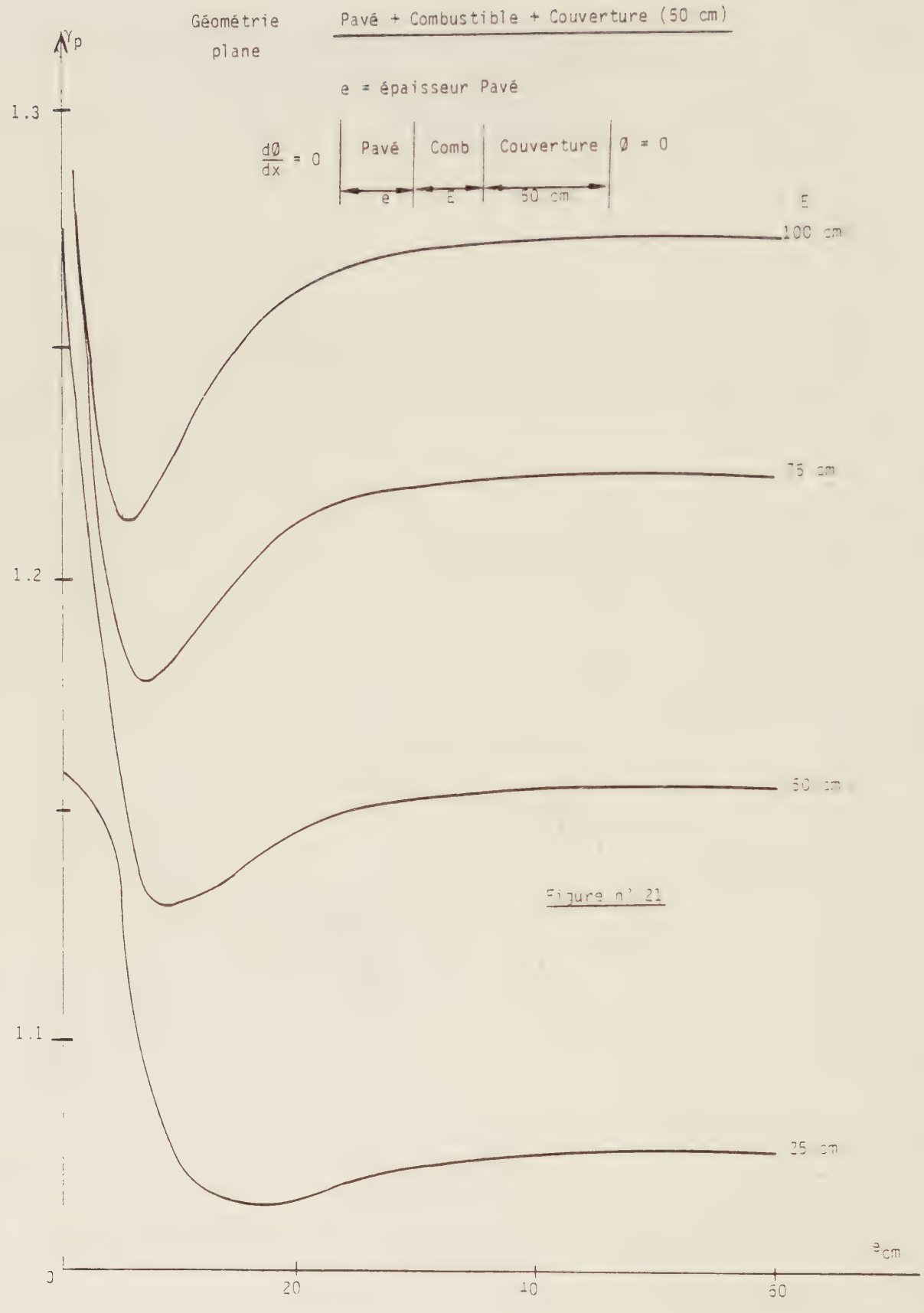

Géométrie plane
Pavé + Combustible + Couverture (50 cm)
e = épaisseur Pavé
dØ/dx = 0
Pavé
Comb
Couverture
Ø = 0
e
ε
50 cm
Yp
1.3
1.2
1.1
0
20
40
60
e cm
ε
100 cm
75 cm
50 cm
25 cm

Figure n° 21

Epaisseur de fertile optimale en fonction de l'épaisseur combustible (géométrie plane avec 50 cm de couverture).

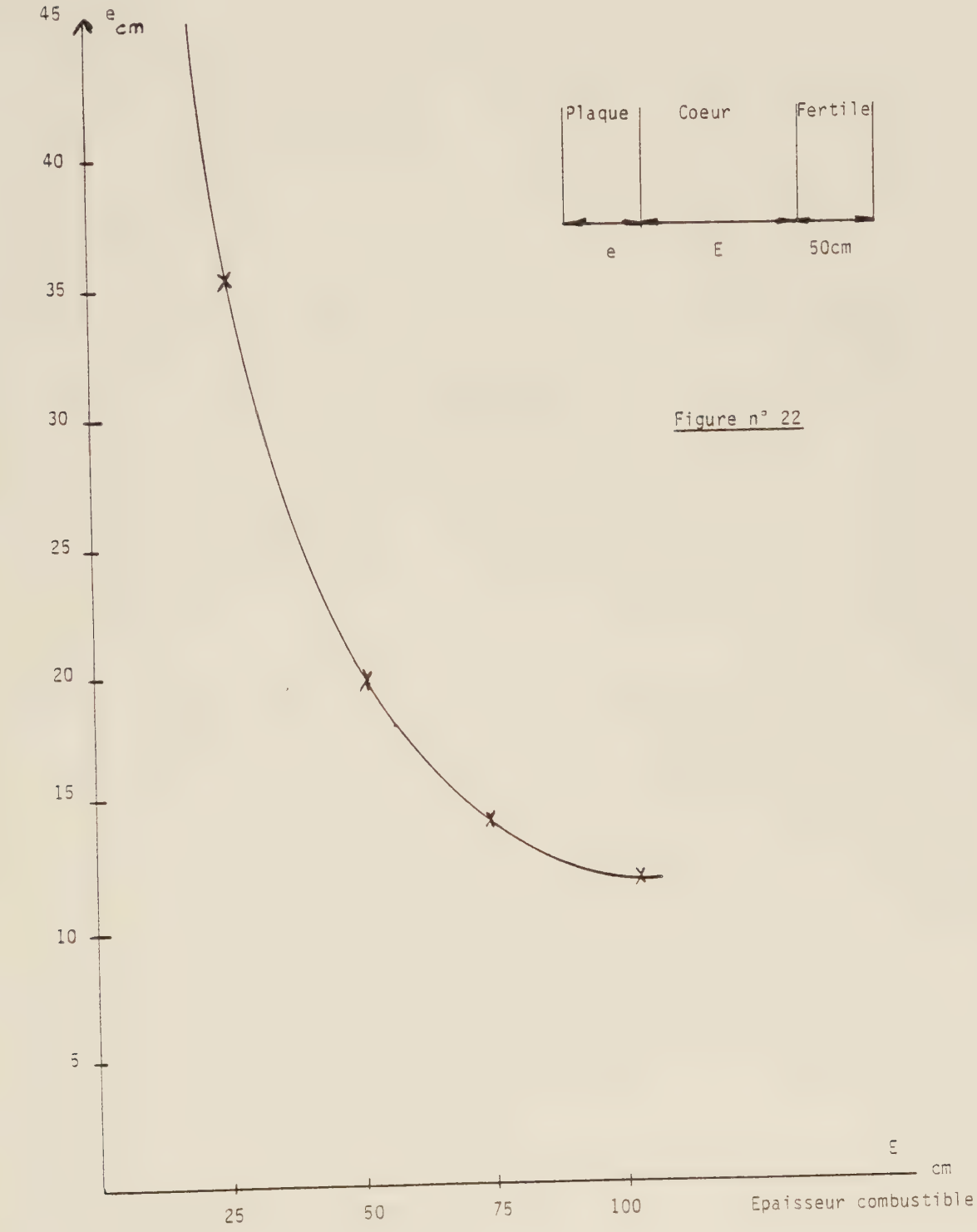


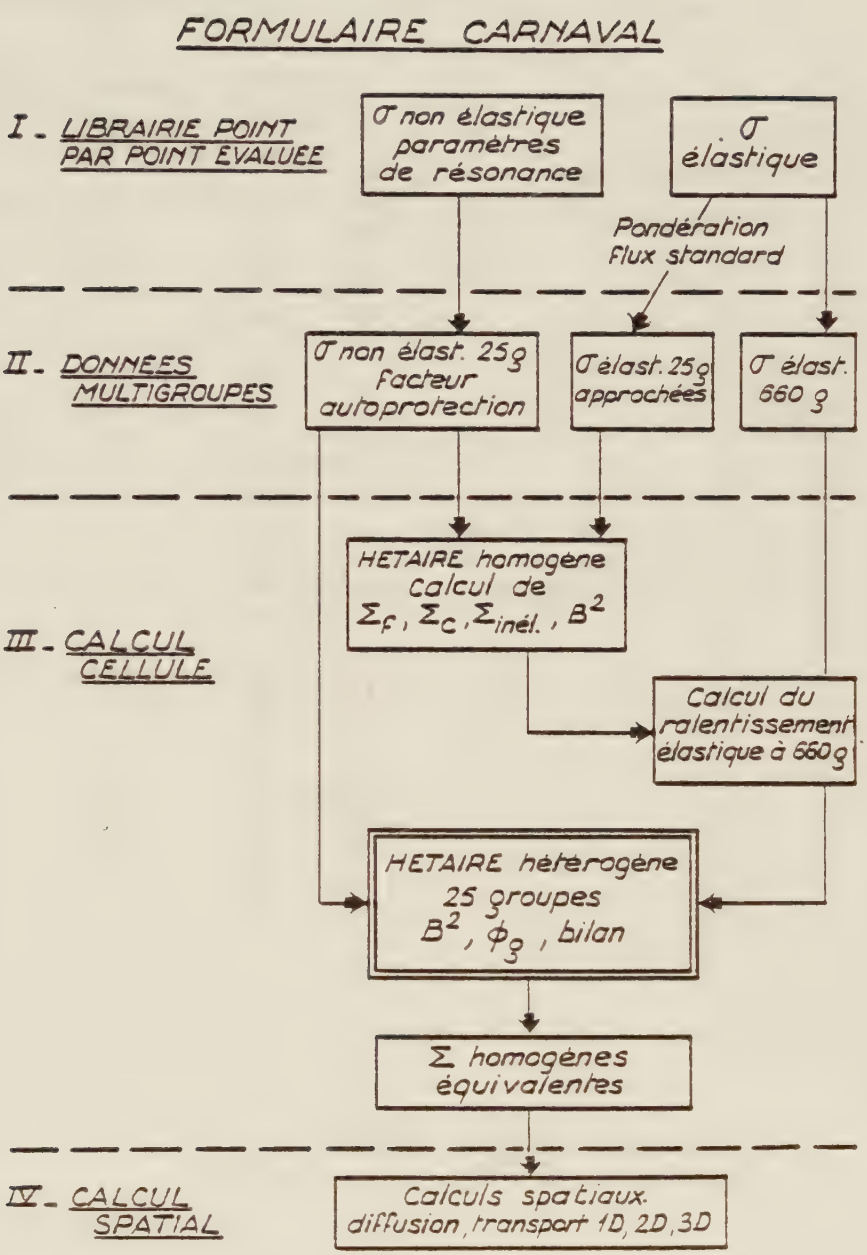

Figure n° 22

# Tableaux

TABLEAU N° 1 Incertitudes

| Paramètres | Précisions visées | Incertidudes actuelles SPX 1 | Incertidudes actuelles Coeurs futurs |
|---|---|---|---|
| Masse critique $\frac{\Delta K}{K}$ | 0.7 % | 1 % | 1 à 2 % |
| Aplatissement en puissance | 2 % | 3,3 % | 5 à 8 % |
| Gain de régénération | 0.03 | 0.04 | 0.04 à 0.07 |
| Antiréactivité des barres | 7 % | 13 % | 15 % à 25 % |
| Vidange Na global | 20 % | 20-30 % | 30 % à 40 % |

TABLEAU N°2


FORMULAIRE CARNAVAL
I - LIBRAIRIE POINT PAR POINT EVALUEE
σ non élastique paramètres de résonance
σ élastique
Pondération flux standard
II - DONNEES MULTIGROUPES
σ non élast. 25 g facteur autoprotection
σ élast. 25 g approchées
σ élast. 660 g
III - CALCUL CELLULE
HETAIRE homogène Calcul de Σf, Σc, Σinél., B²
Calcul du ralentissement élastique à 660 g
HETAIRE hétérogène 25 groupes B², φg, bilan
Σ homogènes équivalentes
IV - CALCUL SPATIAL
Calculs spatiaux. diffusion, transport 1D, 2D, 3D

DECOUPAGE 25 GROUPES DE CARNAVAL

| GROUPES | ENERGIE SUPERIEURE DU GROUPE | ΔU |
|---|---|---|
| 1 | 14,5 MeV | 1,37 |
| 2 | 3,68 MeV | 0,5 |
| 3 | 2,23 MeV | 0,5 |
| 4 | 1,35 MeV | 0,5 |
| 5 | 821 KeV | 0,5 |
| 6 | 498 KeV | 0,5 |
| 7 | 302 KeV | 0,5 |
| 8 | 183 KeV | 0,5 |
| 9 | 111 KeV | 0,5 |
| 10 | 67,4 KeV | 0,5 |
| 11 | 40,9 KeV | 0,5 |
| 12 | 24,8 KeV | 0,5 |
| 13 | 15,0 KeV | 0,5 |
| 14 | 9,12 KeV | 0,5 |
| 15 | 5,53 KeV | 0,5 |
| 16 | 3,36 KeV | 0,5 |
| 17 | 2,04 KeV | 0,5 |
| 18 | 1,23 KeV | 0,5 |
| 19 | 748 eV | 0,5 |
| 20 | 454 eV | 0,5 |
| 21 | 275 eV | 1,0 |
| 22 | 101 eV | 1,5 |
| 23 | 22,6 eV | 2,0 |
| 24 | 3,06 eV | 2,0 |
| 25 | Th | 2,8 |

ΔU Largeur du groupe en léthargie
(léthargie $U = \ell n \frac{E_0}{E}$ où $E_0 = 14,5$ MeV

TABLEAU N°3

DECOUPAGE A 6 GROUPES

| GROUPE | ENERGIE SUPERIEURE DU GROUPE | ΔU | CORRESPONDANCE AVEC LE DECOUPAGE A 25 GROUPES |
|---|---|---|---|
| I | 14,5 MeV | 2,37 | 1, 2 et 3 |
| II | 1,35 MeV | 1 | 4 et 5 |
| III | 498 KeV | 2,5 | 6, 7, 8, 9 et 10 |
| IV | 40,9 KeV | 1,5 | 11, 12 et 13 |
| V | 9,12 KeV | 3 | 14, 15, 16, 17, 18 et 19 |
| VI | 454 eV | 9,8 | 20, 21, 22, 23, 24 et 25 |

ΔU Largeur du groupe en léthargie

TABLEAU N°4

TABLEAU N° 5

Effet sur le Keff de la paramétrisation des sections efficaces microscopiques :

Pour une même géométrie et des concentrations isotopiques fixées, on utilise différents jeux de sections efficaces microscopiques, les résultats sont les suivants :

XC = Pourcentage volumétrique combustible

E = Enrichissement

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sections microscopiques | Xc = 30 % | 37,5 % | 45 % | 30 % |
| correspondant à | E = 12 % | 21 % | 30 % | 30 % |
| Keff | 0.92223 | 0.93010 | 0.94077 | 0.93274 |

L'écart, uniquement dû aux sections efficaces, peut donc atteindre 2000 pcm sur le Keff, ce qui justifie pleinement la nécessité d'une bibliothèque paramétrée.

TABLEAU N° 6

CHAINE D'EVOLUTION

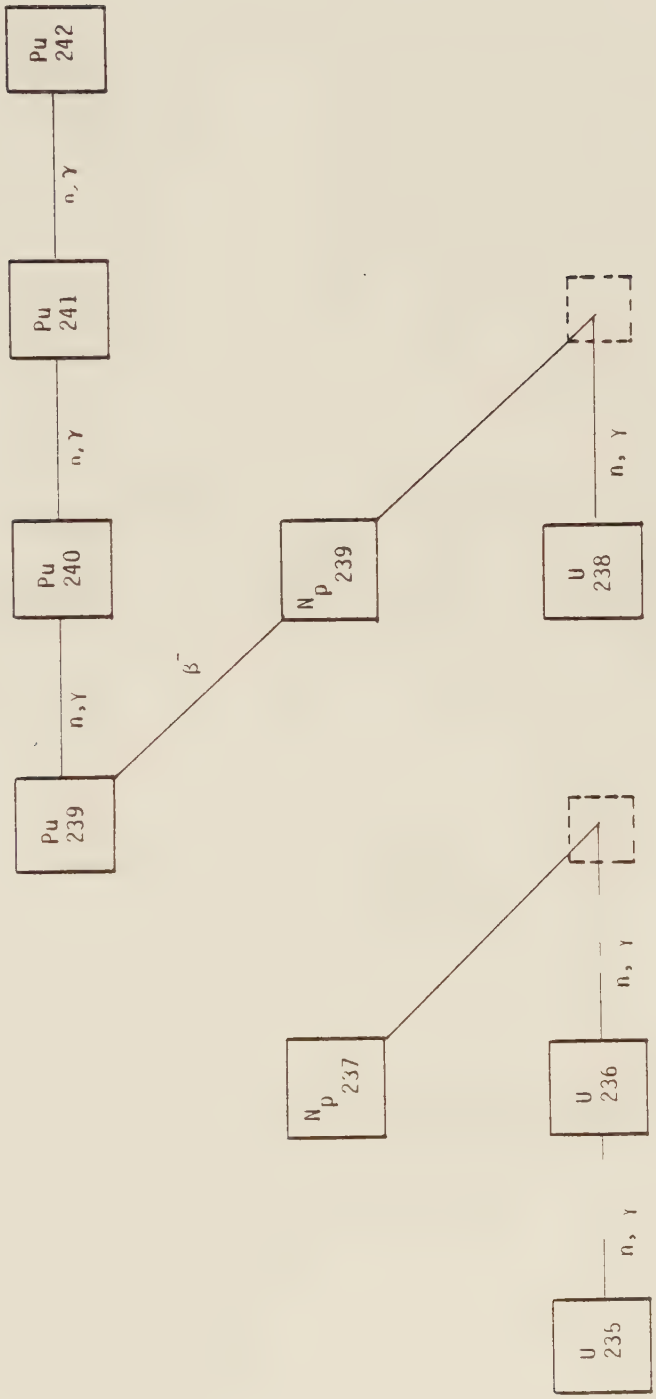


TABLEAU N° 7

Corps et compositions isotopiques (en poids) de chaque milieu (compositions fraiches)

MILIEU COMBUSTIBLE

| | | | |
|---|---|---|---|
| U235 0.40 | Pu 238 1.51 | Fe 70. | PF 0. |
| U238 87.75 | Pu 239 49.75 | Cr 18. | |
| 016 11.85 | Pu 240 20.82 | Ni 9. | Np 237 0. |
| | Pu 241 9.64 | Si 1. | Np 239 0. |
| | Pu 242 5.07 | Mn 2. | |
| | Am 241 1.43 | | |
| | 016 11.78 | Na 100. | |

MILIEU FERTILE

| | | |
|---|---|---|
| U 235 0.22 | Fe 70. | Na 100. |
| U 238 87.93 | Cr 18. | |
| 016 11.85 | Ni 9. | |
| | Si 1. | |
| | Mn 2. | |

MILIEU BARRE

| | | |
|---|---|---|
| Fe 70. | B10 68.71 | Na 100. |
| Cr 18. | B11 8.39 | |
| Ni 9. | C 22.90 | |
| Si 1. | | |
| Mn 2. | | |

MILIEU SUIVEUR DE BARRE ET PROTECTION

| | |
|---|---|
| Fe 70. | Na 100. |
| Cr 18. | |
| Ni 9. | |
| Si 1. | |
| Mn 2. | |

TABLEAU N° 8

CARACTERISTIQUES DES COEURS DE LA FILIERE RAPIDE

| COMBUSTIBLE | Xc | $\overline{E}$ | Xa | R | Xna | XV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| SPX 1 | 37 | 16. | 24 | 0,726 | 34 | 5 |
| Phénix | 36 | 23 | 25 | 0,71 | 36 | 3. |
| SPX2 $\phi$ 7,14 mm | 41 | | 25 | 0,80 | 31 | 3. |
| Cas extrêmes envisagés | 44<br>30 | 12<br>25 | 25. | 0,89 | 29. | |

| FERTILE | Axial Xf ⌢ r = Xa/Xna | | Radial Xf ⌢ r = Xa/Xna | |
|---|---|---|---|---|
| SPX 1 | 38 | 0.75 | 56 | 0.58 |
| Phénix | 35 | 0.72 | 51 | 0,71 |

TABLEAU N° 9

Effet en réactivité (pcm) lié à la variation de + 1 % de la section efficace de capture ou de fission (Perturbation au premier ordre).

| | Coeur | | CRI | | PL | | CAI + CAS + CRE | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_f$ | $\Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_f$ | $\Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_f$ | $\Delta\sigma_c$ | $\Delta\sigma_f$ |
| U 235 | -1 | +7 | -0.3 | +2.3 | -0.1 | 1.1 | -0.1 | 0.9 |
| U 238 | -137 | +55 | -32 | +10 | -15 | 5.0 | -12 | 3.9 |
| Pu 239 | -54 | +307 | / | / | / | / | / | / |
| Pu 240 | -14 | +34 | / | / | / | / | / | / |
| Pu 241 | -2 | +28 | / | / | / | / | / | / |
| Fe | -7 | / | -1 | / | -0.5 | / | -0.4 | / |
| Na | -1 | / | -0.2 | / | / | / | / | / |

TABLEAU N° 10

| | ① | ② | ③ | ④ |
|---|---|---|---|---|
| ΔK (pcm) | - 412 | + 5473 | + 29 | + 37 |

① Section élastique non paramétrée, fixée à une valeur moyenne. L'écart calcul interpolé - calcul exact est d'environ 400 pcm.

② Correction sur section efficace totale seulement, c'est-à-dire qu'on introduit la valeur exacte de la section élastique.

③ Correction sur la section totale et sur la matrice de transfert de groupe à groupe.

④ Section élastique paramétrée.

ΔK représente l'écart sur le keff, entre le calcul exact (valeur HETAIRE) et le calcul approché.

TABLEAU N° 11

Ecarts en réactivité (pcm) entre calcul exact (HETAIRE) et calcul CESAR (bibliothèque)

Géométrie hétérogène ($R = \frac{XA}{XNA}$ fixée à 0.7 XF = 45 %)

| E \ XC | 30 | 32.5 | 35 | 37.5 | 40 | 42.5 | 45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | + 42 | | | | | | + 73 |
| 15 | | + 25 | | | | + 22 | |
| 18 | + 43 | | | + 4 | | | - 2 |
| 19.5 | | + 4 | | | | - 30 | |
| 21 | + 33 | | | - 18 | | | - 20 |
| 22.5 | | - 3 | | | | - 41 | |
| 24 | + 34 | | | | - 26 | | - 17 |
| 27 | | + 16 | | | | - 6 | |
| 30 | + 84 | | | | | | + 88 |

TABLEAU N° 12

## EFFET D'UNE VARIATION DE $\overline{E}$ OU DE $\overline{XC}$

sur le facteur d'aplatissement en puissance $\gamma p$

CONCEPT ENRICHISSEMENTS VARIABLES

Pour de mêmes caractéristiques géométriques de coeur, on modifie soit $\overline{E}$ soit $\overline{XC}$ :

| | ① | ② | ③ | ④ |
|---|---|---|---|---|
| $\overline{XC}$ | 37.5 % | 30 % | 30 % | 30 % |
| $\overline{E}$ | 15.5 % | 15.5 % | 15.5 % | 18.2 % |
| E1/E2 = $\alpha$ | 0.735 | 0.735 | 0.715 | 0.715 |
| $P_1^{max}$ | 308. | 332. | 310. | 310. |
| $P_2^{max}$ | 310. | 296. | 309. | 311. |
| $\gamma p$ | 1.172 | 1.258 | 1.175 | 1.178 |

rem : Si une variation de $\overline{XC}$ ne modifie pas l'optimum du facteur d'aplatissement, ce dernier est obtenu avec une valeur $\alpha$ différente.

TABLEAU N° 13

Caractéristiques des coeurs comparés :

| | Xc variable ① | E variable ② | Hybride ③ |
|---|---|---|---|
| Rayon coeur (cm) | 185. | 185. | 185. |
| Vol1/Vol2 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| $\overline{XC}$ (%) | 37.5 | 37.5 | 37.5 |
| $\overline{E}$ (%) | 15.27 | 15.57 | XC1 = 41.45 |
| | | | XC2 = 30 |
| $\alpha$ | 0.685 | 0.735 | E1 = 12.85 |
| | | | E2 = 22.85 |

Vol1/Vol2 représente le rapport des volumes respectifs des deux zones
XC représente le pourcentage volumétrique combustible moyen
E représente l'enrichissement volumétrique moyen
$\alpha$ représente soit le rapport des pourcentages combustibles,
soit le rapport des enrichissements des deux zones selon le concept.

TABLEAU N°14

INFLUENCE D'UNE VARIATION DE L'ENRICHISSEMENT (E) OU DU POURCENTAGE COMBUSTIBLE (XC) SUR LES FACTEURS D'APLATISSEMENT

Coeur hétérogène de 10 $m^3$.

Configuration 1 pavé fertile + 1 couronne

$\gamma p$ = facteur d'aplatissement en puissance

$\gamma DPA$ = facteur d'aplatissement en DPA

| XC | 37.5 | 37.5 | 30 |
|---|---|---|---|
| E | 21 | 15. | 21. |
| Keff | 1.20835 | 1.00250 | 1.10900 |
| $\gamma$ p | 1.402 | 1.402 | 1.405 |
| $\gamma$ DPA | 1.412 | 1.411 | 1.415 |

TABLEAU N° 15

Résultats optimums sur des coeurs cylindriques :
Comparaison cylindrique ⟷ plane

5m³

| | X hété | Coeur 2 Epaisseur Comb | Epaisseur couronne | Selon géométrie plane ↓ couronne E.optimale | γ p |
|---|---|---|---|---|---|
| Pavé = 2 % | 10 % | 61 cm | 11 cm | 17 cm | 1,20 |
| | 12 | 58 | 13 | 17 | 1,19 |
| | 16 | 54 | 18 | 19 | 1,17 |
| | 20 | 50 | 22 | 20 | 1,16 |
| | 24 | 46 | 26 | 22 | 1,15 |

15 m³

| | X hété | Coeur 2 Epaisseur Comb | Epaisseur couronne | Epaisseur couronne optimale | γ p |
|---|---|---|---|---|---|
| Pavé = 2 % | 5. | 107 | 7. | 12. | 1,27 |
| | 8. | 98 | 13. | 12. | 1,23 |
| | 10. | 94 | 17. | 12. | 1,23 |
| | 20. | 80 | 36. | 14. | 1,24 |

20 m³

| | X hété | Coeur 2 Epaisseur Comb | Epaisseur couronne | Epaisseur couronne optimale | γ p |
|---|---|---|---|---|---|
| Pavé = 2 % | 10. | 106. | 19. | 12. | 1,26 |
| | 14. | 99. | 27. | 12. | 1,28 |
| | 18. | 93. | 36. | 12. | 1,28 |
| | 26. | 83. | 57. | 13. | 1,29 |
| Pavé = 5 % | 9. | 101. | 9. | 12. | 1,23 |
| | 13. | 94. | 17. | 12. | 1,22 |
| | 23. | 81. | 37. | 14. | 1,23 |
| Pavé = 10 % | 12. | 91. | 4. | 13. | 1,27 |
| | 20. | 79. | 19. | 14. | 1,20 |
| | 30. | 68. | 38. | 15. | 1,20 |

Imprimé par le Bureau de Documentation du CEN/ CADARACHE

RESUME

Le travail comporte deux parties :

- Premièrement, l'élaboration d'un outil de calcul spécifiquement adapté au problème des études paramétriques des coeurs de la filière rapide dans le domaine neutronique.

- Deuxièmement, une étude paramétrique, à l'aide de l'outil précédent, comparant les capacités respectives à aplatir les niveaux de flux neutronique et de puissance des concepts de coeur suivants :

  - Homogène à compositions variables
  - Homogène à enrichissements variables
  - Hétérogène

Cette étude a fait ressortir l'intérêt d'un concept hybride à enrichissements et compositions variables.

Mots clés : Réacteur rapide (à neutrons) - Neutronique - Code de calcul - Etude paramétrique